

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE ÓPTICA Y OPTOMETRÍA**



**TESIS DOCTORAL**

**Valoración de la percepción de contraste en conducción  
mesópica: métodos psicofísicos de simulación**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTORA

PRESENTADA POR

**Marta María García Rojo**

DIRECTORES

**Celia Sánchez Ramos**  
**Cristina Bonnin Arias**

Madrid

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE ÓPTICA Y OPTOMETRÍA**



**TESIS DOCTORAL**

Valoración de la percepción de contraste en conducción mesópica: métodos psicofísicos de simulación

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Marta María García Rojo

DIRECTOR

Celia Sánchez Ramos  
Cristina Bonnin Arias







# AGRADECIMIENTOS

---



## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría aprovechar estas líneas para expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su apoyo me han ayudado en la realización de esta Tesis Doctoral:

Ante todo, me gustaría reconocer a la Dra. Celia Sánchez-Ramos por animarme siempre a formarme y seguir en la vida académica, así como por su esfuerzo y confianza depositada en mí al aceptar la dirección de esta Tesis Doctoral.

Mi agradecimiento más especial a la Dra. Cristina Bonnin Arias por todos estos años de seguimiento, dedicación y perseverancia, que me han alentado a ir avanzando en el camino de la Tesis.

A mis compañeros de la Universidad Complutense, Óptica Sanra y Clínica Rementería por su apoyo y consejos a lo largo de estos años. En especial atención: Jorge, Carolina, Cristina, Victoria, Vanesa, Fé, Jessica, Alicia, Eva, María Jesús y Maribel.

A todos los participantes del estudio, por su disposición y colaboración desinteresada en llevarlo a cabo.

A todos mis amigos, mi gran soporte, que me han sabido aconsejar y dar ánimos en los momentos más complicados: Elena, Ana, Raquel, Rocío, Laura, Conchi, Sonia, Ángela, Alberto, Álvaro, Jon, Reme, Juan, Anita, Sergio, Raquel, Cris, Marta, Lorena, Patri, Felipe, Amaya, Chuni, Jin y todos aquellos que me han ofrecido su amistad a lo largo de este tiempo.

A mi compañero de vida, Álar, por siempre creer en mí y estar “ahí” para todo en todo momento.

A mis sobrinos Óscar y Pipa me dais luz y energía para continuar.

Por último, a mi familia, en especial mis padres, mis abuelos y mi hermana Esther. Mil gracias siempre por vuestro esfuerzo en mi formación académica y personal. Sin vuestro apoyo y cariño incondicional nada de esto hubiera sido posible.



A mi amiga Laura



# ÍNDICE

---





# ÍNDICE

<b>RESUMEN / ABSTRACT .....</b>	<b>3</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Emisor: la luz .....</b>	<b>9</b>
1.1.1 La luz: dualidad onda-corpúsculo .....	9
1.1.2 Espectro electromagnético y luz “visible” .....	12
1.1.3 Fuentes de luz .....	14
1.1.4 Radiometría y Fotometría .....	17
<b>1.2 El receptor: las estructuras oculares .....</b>	<b>21</b>
1.2.1 Retina .....	22
<b>1.3 Interacción emisor-receptor .....</b>	<b>28</b>
1.3.1 Sensibilidad espectral del sistema visual.....	29
1.3.2 Adaptación a la oscuridad.....	33
1.3.3 Función visual.....	36
1.3.4 Visión y edad .....	57
<b>1.4 Conducción de vehículos .....</b>	<b>59</b>
1.4.1 Reglamento de conducción en España .....	67
1.4.2 Relación entre visión y accidentes de tráfico .....	71
1.4.3 Caracterización visual en conducción nocturna y diurna ....	73
1.4.4 Conducción y edad .....	74
<b>1.5 Filtros ópticos.....</b>	<b>78</b>
<b>2 JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>83</b>
<b>3 HIPÓTESIS .....</b>	<b>87</b>
<b>4 OBJETIVOS .....</b>	<b>91</b>
4.1 Objetivo general .....	91
4.2 Objetivos específicos.....	91
<b>5 MATERIAL Y MÉTODO .....</b>	<b>95</b>

<b>5.1</b>	<b>Muestra.....</b>	<b>95</b>
5.1.1	Criterios de inclusión .....	95
5.1.2	Criterios de exclusión.....	95
<b>5.2</b>	<b>Material.....</b>	<b>96</b>
5.2.1	Sala de exploración .....	96
5.2.2	Luxómetro digital Mavolux 5032B USB.....	99
5.2.3	Test ETDRS retroiluminado .....	100
5.2.4	Panel CSV 1000 retroiluminado.....	103
5.2.5	Filtros de diferentes densidades ópticas.....	104
5.2.6	Frontofocómetro con espectrofotómetro .....	104
<b>5.3</b>	<b>Método.....</b>	<b>105</b>
5.3.1	Diseño del estudio .....	105
5.3.2	Medida de la iluminación ambiente.....	105
5.3.3	Caracterización de los filtros.....	106
5.3.4	Parámetros evaluados .....	106
5.3.5	Protocolo de evaluación.....	108
5.3.6	Análisis estadístico .....	110
<b>6</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>113</b>
<b>6.1</b>	<b>Caracterización de la muestra.....</b>	<b>113</b>
<b>6.2</b>	<b>Luminancia de los optotipos, test y sala.....</b>	<b>114</b>
<b>6.3</b>	<b>Agudeza visual mesópica.....</b>	<b>114</b>
<b>6.4</b>	<b>Agudeza visual fotópica .....</b>	<b>115</b>
6.4.1	Agudeza visual fotópica sin filtro y con filtros.....	115
<b>6.5</b>	<b>Influencia de la edad en la agudeza visual.....</b>	<b>119</b>
6.5.1	Agudeza visual mesópica .....	119
6.5.2	Agudeza visual fotópica .....	120
<b>6.6</b>	<b>Relación entre la agudeza visual mesópica y fotópica .....</b>	<b>126</b>
6.6.1	Concordancia agudeza visual mesópica y fotópica de máximo contraste (100%) .....	126
<b>6.7</b>	<b>Predictor fotópico de la agudeza visual mesópica de contraste 100% para el total de la muestra .....</b>	<b>127</b>

6.7.1 Agudeza visual fotópica con filtro de 80% y test de contraste Weber de 20% .....	130
<b>6.8 Predictor fotópico de la agudeza visual mesópica de contraste 100% para menores de 50 años .....</b>	<b>132</b>
6.8.1 Agudeza visual fotópica con filtro de 90% y test de contraste Weber de 100% en menores de 50 años .....	135
6.8.2 Agudeza visual fotópica con filtro de 80% y test de contraste Weber de 20% en menores de 50 años .....	136
<b>6.9 Predictor fotópico de la agudeza visual mesópica de contraste 100% para mayores de 50 años .....</b>	<b>137</b>
6.9.1 Agudeza visual con filtro de 80% y test de contraste Weber de 20% en mayores 50 años .....	140
<b>6.10 Sensibilidad al contraste mesópica .....</b>	<b>141</b>
<b>6.11 Sensibilidad al contraste fotópica .....</b>	<b>142</b>
6.11.1 Sensibilidad al contraste fotópica sin y con filtros .....	142
<b>6.12 Influencia de la edad en la sensibilidad al contraste .....</b>	<b>143</b>
6.12.1 Sensibilidad al contraste mesópica .....	143
6.12.2 Sensibilidad al contraste fotópica .....	144
<b>6.13 Relación entre la sensibilidad al contraste mesópica y fotópica .....</b>	<b>149</b>
6.13.1 Frecuencia espacial 3 cpg .....	151
6.13.2 Frecuencia espacial 6 cpg .....	152
6.13.3 Frecuencia espacial 12 cpg .....	153
6.13.4 Frecuencia espacial 18 cpg .....	154
<b>6.14 Relación entre la sensibilidad al contraste mesópica y fotópica en menores de 50 años .....</b>	<b>156</b>
6.14.1 Frecuencia espacial 3 cpg .....	158
6.14.2 Frecuencia espacial 6 cpg .....	159
6.14.3 Frecuencia espacial 12 cpg .....	160
6.14.4 Frecuencia espacial 18 cpg .....	161
<b>6.15 Relación entre la sensibilidad al contraste mesópica y fotópica en mayores de 50 años .....</b>	<b>163</b>

6.15.1	Frecuencia espacial 3 cpg .....	165
6.15.2	Frecuencia espacial 6 cpg .....	166
6.15.3	Frecuencia espacial 12 cpg .....	167
6.15.4	Frecuencia espacial 18 cpg .....	168
<b>7</b>	<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>173</b>
7.1	Aspectos generales de la conducción .....	173
7.2	Análisis de los métodos de evaluación utilizados .....	177
7.3	Análisis de los resultados obtenidos .....	181
7.3.1	Análisis de los resultados de la agudeza visual.....	181
7.3.2	Análisis de los resultados de la sensibilidad al contraste .	185
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>193</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>197</b>
<b>10</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>213</b>
10.1	Comité de ética.....	213
10.2	Cuaderno de recogida de datos .....	214
10.3	Consentimiento de investigador principal .....	217
10.4	Hoja de información a los participantes.....	218
10.5	Formulario de consentimiento informado.....	219
10.6	Recomendaciones del Eyesight Working Group.....	220
10.7	Normativa Comunidad Económica Europea.....	255
10.8	Normativa española .....	260
10.9	Contribuciones científicas de este trabajo .....	267
10.9.1	SIYO 2016 .....	267
10.9.2	SIYO 2018 .....	268
10.9.3	PhDay 2019- Premio mejor póster.....	269
10.9.4	OPTOM 20/20 (pendiente 2021).....	271
10.10	Lista de tablas .....	272
10.11	Lista de figuras .....	280

# RESUMEN / ABSTRACT

---



## RESUMEN / ABSTRACT

### RESUMEN

En condiciones de iluminación mesópica la información visual se reduce, y la detección de contornos y la percepción del color están disminuidas. Esta reducción en la percepción visual durante la conducción nocturna, da lugar a un mayor riesgo de accidentes. Por ello, para la obtención y renovación del permiso de conducir, es fundamental incluir valoraciones de la agudeza visual y la sensibilidad al contraste en condiciones de baja iluminación, similares a los que existen durante la conducción nocturna.

El objetivo de esta Tesis Doctoral es encontrar un predictor de la función visual mesópica mediante valoraciones en condiciones fotópicas utilizando elementos de simulación. Para ello, en primer lugar, se ha estudiado la correlación entre la agudeza visual mesópica y la agudeza visual fotópica, evaluadas con el test ETDRS de diferentes contrastes y con la interposición de filtros de distintas densidades ópticas. Por otro lado, se ha analizado la correlación entre la sensibilidad al contraste mesópica y la sensibilidad al contraste fotópica, medida con el test CSV-1000, con interposición de los filtros.

El estudio se ha llevado a cabo en 56 personas, con edades comprendidas entre 20 y 71 años, todas ellas en posesión del permiso español de conducción.

Los resultados indican que, en condiciones de iluminación fotópica, el uso de optotipos de contraste 20% con filtro del 80% permite valorar, por simulación, la agudeza visual mesópica. Por otra parte, el empleo de filtros del 90% y 70% para la evaluación de la sensibilidad al contraste en condiciones fotópicas permite inferir el estado de la función visual de conductores en condiciones de baja iluminación.

En conclusión, se han determinado unos predictores económicos y prácticos para valorar la función visual mesópica mediante métodos psicofísicos de simulación en condiciones fotópicas.





## ABSTRACT

Under mesopic lighting conditions, visual information is reduced; contour discrimination and color perception are decreased. This reduction in visual perception during night driving increases the risk of accidents. Therefore, for the obtention and renovation of a driving license, it is essential to include visual acuity and contrast sensitivity assessments in low-light conditions, similar to those that exist during night driving.

The objective of this Thesis is to find a predictor of mesopic visual function through analysis under photopic conditions using simulation elements. For this aim, first, the correlation between mesopic visual acuity and photopic visual acuity was studied, evaluated with the ETDRS test of different contrasts and with the interposition of filters of different optical densities. On the other hand, the correlation between mesopic contrast sensitivity and photopic contrast sensitivity, measured with the CSV-1000 test with filter interposition, was analyzed.

The study was carried out in 56 people, aged between 20 and 71 years, all of them in possession of the Spanish driving license.

The results indicate that, the use of 20% contrast optotypes with an 80% filter for the assessment of the visual acuity, and the use of filters of 90% and 70% for contrast sensitivity, in photopic conditions, allows us to know the status of the visual function of drivers overnight.

In conclusion, economic and practical predictors have been determined to assess mesopic visual function using psychophysical simulation methods under photopic conditions.



# INTRODUCCIÓN

---



## 1 INTRODUCCIÓN

Para comprender el proceso de visión, es necesario analizar la interacción entre el emisor y el receptor. En nuestro caso, el emisor es la luz o la radiación electromagnética y el receptor lo forman las estructuras oculares, en concreto la retina. En esta introducción se analizarán aspectos elementales del emisor, el receptor y la interacción de estos, la cual produce la percepción visual. También es de especial interés profundizar en la interacción entre emisor y receptor bajo diferentes condiciones de iluminación ambiente (mesópica y fotópica). Por otro lado, se analizará la influencia de la edad en la visión. Además, se examinarán generalidades en la conducción de vehículos, así como los permisos vigentes y clases de conducción. Para terminar el epígrafe se estudiarán los filtros y sus propiedades.

### 1.1 Emisor: la luz

#### 1.1.1 La luz: dualidad onda-corpúsculo

En la historia de la ciencia, pocos fenómenos naturales observables han tenido una repercusión, estudio y discusión tan fructífera como ha sido el análisis de la naturaleza de la luz. Actualmente, es admitida la dualidad onda-corpúsculo de la luz. Esto significa que en ocasiones la luz muestra propiedades y comportamientos ondulatorios en determinados experimentos, mientras que en otras condiciones e interacciones, presenta claramente un comportamiento corpuscular (1).

Fue Max Planck quien el 14 de diciembre de 1900 en unas conferencias organizadas por la Sociedad Física de la Academia de Ciencias de Berlín, enunció su hipótesis sobre la absorción discreta de dicha energía electromagnética. Para ello introdujo la constante de Planck o " $h$ ".

La luz es una radiación integrante del espectro electromagnético y está formada por partículas elementales llamadas fotones (del griego phôs, que

## INTRODUCCIÓN

significa luz) portadoras de una energía radiante directamente proporcional a su frecuencia. La energía asociada a un fotón viene dada por la siguiente expresión, también conocida como “*fórmula de Planck*”:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu$$

$h$ : constante de Planck ( $6,62 \cdot 10^{-34}$  J·s).

$c$ : velocidad de la luz en el vacío ( $3 \cdot 10^8$  m/s).

$\nu$ : frecuencia de la radiación.

$\lambda$ : longitud de onda.

### Fórmula 1. Fórmula de Planck.

Los fotones gozan de una propiedad fundamental: no tienen masa. Tampoco pueden desintegrarse espontáneamente. Así mismo, no poseen carga eléctrica. El hecho de que no posean carga, no implica que no puedan ser ionizantes. Si la energía asociada al fotón es suficientemente alta (del orden de 20 eV, siendo  $1\text{eV} = 1,602 \times 10^{-19}\text{J}$ ) pueden ionizar la materia. Este tipo de fotones son los que conforman un tipo de radiación especial: rayos gamma y rayos X.

Para la luz “visible”, la energía de un fotón es aproximadamente  $4 \times 10^{-19}$  J. Esta energía ya es suficiente como para excitar las moléculas fotosensibles de la retina y dar origen a la visión tal y como se conoce en fisiología ocular. Para el análisis de la radiación luminosa y su transmisión se acude a la naturaleza ondulatoria.

Desde el punto de vista ondulatorio, la luz es una onda electromagnética de tipo esférica. Los principales parámetros de las ondas se representan mediante la siguiente imagen de una onda unidimensional (2):

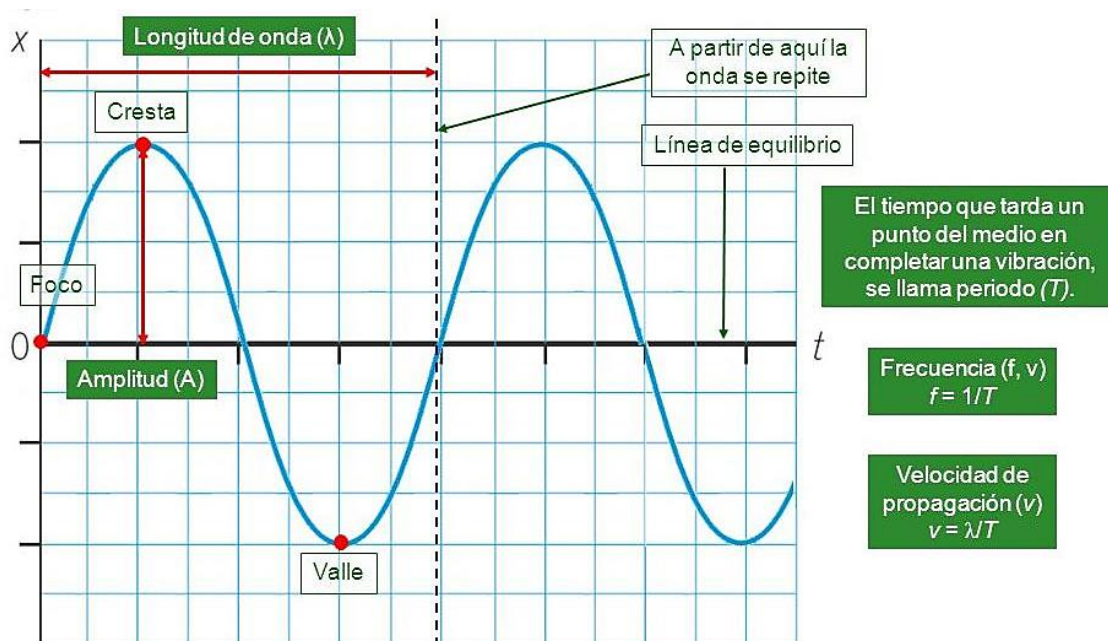


Figura 1. Representación gráfica de los principales parámetros de una onda. Tomado de Santillana, 2012.

La longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia entre dos crestas, o entre dos valles, consecutivos; esto es, la distancia que cubre una onda en el tiempo que dura un período ( $T$ ). Se mide pues en unidades de longitud. La amplitud ( $A$ ) de una onda se define como el valor máximo del campo eléctrico que se obtiene al propagarse la onda; determina la intensidad de la onda, que es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud.

La tercera característica de una onda es su frecuencia ( $\nu$  o  $f$  según autores), que corresponde al número de veces que se repite un suceso por unidad de tiempo, el número de crestas o de valles. La frecuencia se mide en Hz.

La longitud de onda  $\lambda$  y  $\nu$  la frecuencia de oscilación están relacionadas por una constante, que no es otra que la velocidad de la luz  $c$  en el vacío (299 792 458 m/s).

Atendiendo a las leyes de Maxwell, la luz es una onda sinusoidal en la que la variable que oscila periódicamente es la amplitud del campo eléctrico  $E(t)$ . Atendiendo a la ley de Ampère, esta variación genera a su vez un campo

## INTRODUCCIÓN

magnético variable en el tiempo  $B(t)$ . Así mismo, la ley de Faraday establece que un campo magnético variable genera de nuevo un campo eléctrico variable.

El campo eléctrico genera al magnético y viceversa, lo que produce un efecto de “auto propagación” de la onda por la autogeneración continua de sendos campos  $E(t)$  y  $B(t)$ . Los campos E y B son perpendiculares entre sí y respecto a la dirección de su propagación. Además, ambos están en fase siendo en cada instante y en cada punto las densidades de energía magnética y eléctrica son iguales (1).

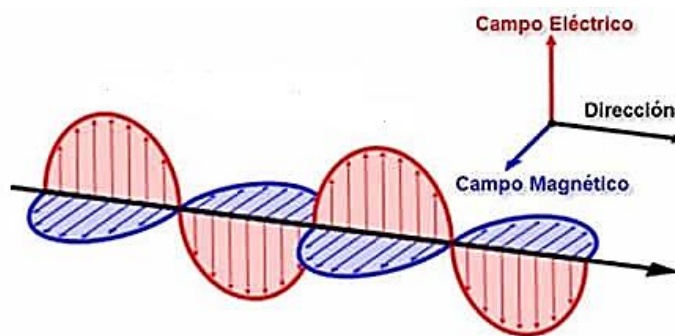


Figura 2. Onda electromagnética. Tomada de <http://www.areatecnologia.com>

### 1.1.2 Espectro electromagnético y luz “visible”

Las ondas electromagnéticas se propagan en los distintos medios a una velocidad diferente. En el vacío se propagan a la máxima velocidad, la velocidad de la luz ( $c$ ). En otros medios, la velocidad de propagación viene dada por el índice de refracción ( $n$ ) del medio óptico, parámetro que determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio homogéneo.

La ordenación de los diversos tipos de radiación electromagnética según sus energías, o lo que es lo mismo, según su frecuencia o longitud de onda, recibe el nombre de espectro electromagnético (2).



De la expresión de Planck (fórmula 1) deducimos que las ondas electromagnéticas de alta frecuencia tienen una longitud de onda corta y mucha energía, mientras que las ondas de baja frecuencia tienen grandes longitudes de onda y poca energía. Todo esto se puede representar gráficamente en el espectro.

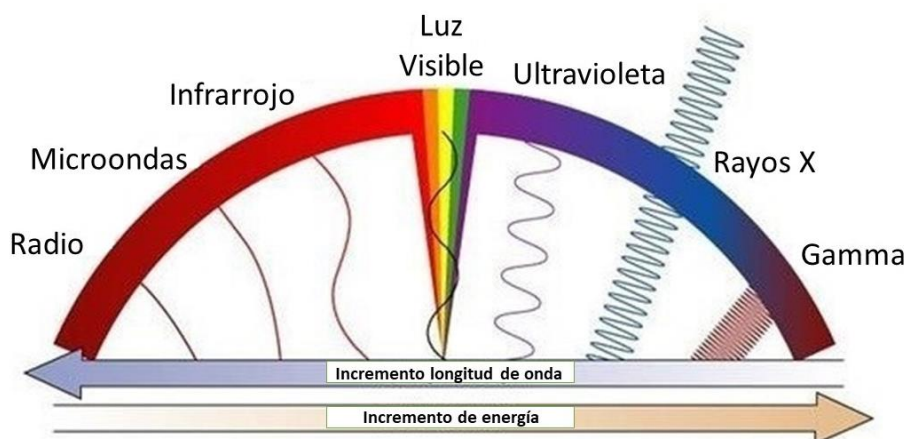


Figura 3. Espectro electromagnético. Tomada de University of Waikato.

Por lo general, las radiaciones electromagnéticas se pueden clasificar en los siguientes grupos, dependiendo del rango de su longitud de onda.

Tabla 1. Clasificación de principales radiaciones electromagnéticas

Tipo	Rango (m)
Ondas de radio	$< 10 \times 10^3$
Microondas	$< 10^{-2}$
Infrarrojos	$< 1 \times 10^{-3}$
Espectro visible	$< 780 \times 10^{-9}$ (rangos exactos 390 a 750nm)
Ultravioleta	$< 380 \times 10^{-9}$
Rayos X	$< 10 \times 10^{-9}$
Rayos gamma	$< 10 \times 10^{-12}$

## INTRODUCCIÓN

De todo este amplio espectro, la parte que el observador humano puede ver con su sistema visual es muy pequeña, en comparación con las otras regiones espectrales. Es el denominado espectro visible, cuyos límites inferior y superior de longitud de onda oscilan, aproximadamente, entre los 380 nm y los 780 nm respectivamente ( $1\text{nm}=10^{-9}\text{ m}$ ). Aunque un ojo adaptado a la oscuridad puede ver en un intervalo mayor, que abarca desde 360 nm a 830 nm (1, 3).



Figura 4. Espectro visible por el ojo humano. Tomada de [www.areajovensedoptica.blogspot.com](http://www.areajovensedoptica.blogspot.com)

### 1.1.3 Fuentes de luz

En el siguiente epígrafe se realiza un breve resumen de las características más elementales relativas a la procedencia de la luz. La luz puede provenir de fuentes naturales o artificiales, y en cada caso posee una serie de características.

#### 1.1.3.1 Luz natural

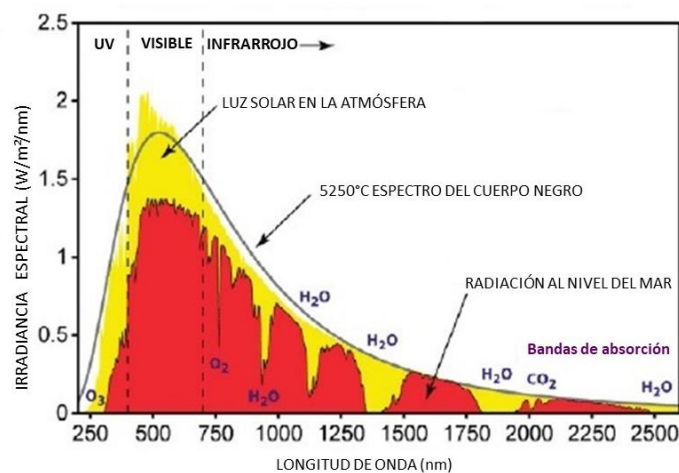
La principal fuente de luz natural es la proveniente del sol; sea de forma directa (a través de los rayos solares), o indirecta (debida a la reflexión de la luz en la atmósfera con o sin nubes, en la luna o con el entorno). La fuente natural de iluminación es el sol, una estrella que se encuentra en la fase denominada de secuencia principal y según la clasificación espectral de Harvard es de tipo espectral G2V situado a una distancia media aproximada de 149.600.000 kilómetros. La luz que emite, tarda en llegar hasta nosotros, aproximadamente 8 minutos y 30 segundos (4).

El nivel de radiación directa que llega a la superficie de la Tierra depende de múltiples factores como la posición del sol, la altitud, la latitud, la presencia

de nubes, la cantidad de ozono en la atmósfera, la reflexión terrestre, la época del año, la contaminación y otros (5, 6). También hay que tener en cuenta la radiación reflejada, que varía según la superficie sobre la que incide. Así, la nieve es la superficie que más radiación refleja, alcanzando hasta un 85-90%, mientras que el asfalto refleja hasta un 12%, la arena seca de playa el 10-15% y el agua de mar el 50% (7).

La radiación solar fuera de la atmósfera terrestre tiene su mayor intensidad en el rango de 100 a 3000 nm (radiación ultravioleta, visible e infrarroja), mientras que la radiación solar recibida en la superficie de la Tierra está en el rango de 290 a 2500 nm. La radiación solar se ve atenuada al pasar a través de la atmósfera, debido fundamentalmente a los fenómenos de absorción y dispersión. Resulta complejo comprender su distribución espectral con exactitud, ya que los valores normalmente se efectúan a nivel del suelo, de tal manera que el espectro medido se ve alterado por los factores anteriormente citados (7).

En la siguiente figura se muestra, a título ilustrativo, la distribución espectral de la radiación solar en diferentes escenarios:



**Figura 5.** Distribución de la radiación solar en la alta atmósfera y al nivel del mar, en diferentes circunstancias. Tomada de [espaciosolar.blogspot.com.es](http://espaciosolar.blogspot.com.es)

## INTRODUCCIÓN

Los distintos componentes de las diversas capas de la atmósfera modifican la distribución espectral de la radiación solar, al atravesarlas hasta llegar a la superficie terrestre. El componente ultravioleta (UV) de la radiación terrestre, con un sol de mediodía, está compuesto por aproximadamente un 95% de radiación UVA (315-400 nm) y un 5% de UVB (280-315 nm) (7); casi toda la radiación UVC (100-280 nm) y la mayor parte de la radiación UVB es absorbida por el ozono estratosférico (6, 7). Las longitudes de onda del rango visible no sufren prácticamente variación. Por último, ciertas radiaciones infrarrojas se absorben en la troposfera. La absorción se produce, principalmente, por el vapor de agua y el dióxido de carbono, aunque otros gases, como el monóxido de carbono, el metano y el óxido nitroso también participan en la absorción de ciertas longitudes de onda infrarrojas (8).

A pesar de estas modificaciones sustanciales, aproximadamente dos tercios de la energía solar que entra en la atmósfera llega hasta la superficie de la tierra y está compuesta, aproximadamente, por un 7% de radiación ultravioleta, un 43% de radiación visible, un 49% de radiación infrarroja y un 1% de otras radiaciones (9).

### 1.1.3.2 Luz artificial

Se denomina luz artificial a aquella que proviene de lámparas u otros objetos luminosos controlados por el hombre, es por tanto una luz generada por una fuente artificial (no natural).

Se distinguen dos tipos principales de fuentes de radiación visible artificial: las térmicas y las de descarga eléctrica. Las primeras son las fuentes térmicas; se denominan así a los cuerpos calientes que emiten energía radiante con una distribución espectral continua, que está en función de su composición química y de la temperatura. Las segundas, las lámparas de incandescencia o de descarga eléctrica son fuentes térmicas fundamentadas en el calentamiento de un filamento que normalmente es tungsteno, como consecuencia de su elevado punto de fusión (10).

Ejemplo de fuentes térmicas son las bombillas incandescentes. Se trata de un tipo de alumbrado muy ineficiente ya que el 90% de la energía consumida se pierde en forma de calor y únicamente el 10% se transforma en luz “visible”. Adicionalmente, su vida útil es muy corta.

Las lámparas de descarga constituyen otra forma de producir luz, pero de una manera más eficiente y económica que las anteriores. Este tipo de lámparas, se basan en el principio de electroluminiscencia; ésta se define como la emisión de luz producida por determinados materiales cuando se someten a la acción de un campo eléctrico. La introducción de cargas de distinto signo en el material electroluminiscente genera un estado excitado que produce una emisión de luz. El estado excitado responsable de la emisión es el mismo que el observado en los fenómenos de fluorescencia (10). Ejemplos de este tipo de fuentes de luz artificial son los tubos fluorescentes y las lámparas espectrales (11).

Actualmente, por su alta eficiencia, su larga duración y su capacidad de producir toda la gama de colores, cada vez está más extendido el uso para iluminación ambiente de los diodos emisores de luz o LED (Light-Emitting Diode). El principio de funcionamiento de los LED es la electroluminiscencia: emiten luz en respuesta a una corriente eléctrica que fluye a través de él, o por efecto de un campo eléctrico (10, 11).

### 1.1.4 Radiometría y Fotometría

La radiometría es la disciplina científica que estudia la radiación electromagnética. La radiación energética se cuantifica por medio de magnitudes radiométricas, que son independientes del detector.

La percepción visual viene determinada por la respuesta de los fotorreceptores a la radiación electromagnética. El sistema visual humano actúa como detector. Una parte de la radiometría que estudia este fenómeno es la fotometría, basada en el efecto que la radiación provoca en el sistema visual humano (12).

## INTRODUCCIÓN

Fue necesario establecer un patrón en 1948, en la Conferencia General de Pesas y Medidas, estableciéndose la candela como unidad de intensidad luminosa. Definiéndose esta como: “una sexagésima parte de la luz emitida por un centímetro cuadrado de platino puro en estado sólido a la temperatura de su punto de fusión (2046 °K)” (13).

La definición de la candela sufrió cambios en 1979, debido a problemas técnicos con la anterior, quedando lo siguiente: “es la intensidad luminosa en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  hercios y de la cual la intensidad radiada en esa dirección es  $1/683 \text{ W/sr}$ ” (13).

Teniendo en cuenta las propiedades ópticas y fisiológicas del ojo, existen dos tipos fundamentales de fuentes emisoras de energía radiante: la fuente extensa y la puntual. El criterio que las distingue es el valor, en radianes, del ángulo subtendido por la fuente, medido desde el ojo (cociente entre la dimensión de la fuente luminosa y la distancia de observación). Se considera que la fuente es puntual cuando su diámetro aparente es inferior o igual a un minuto de arco.

A continuación, se definen las medidas radiométricas más relevantes (14):

- Energía radiante: energía lumínica emitida o recibida. Se mide en Julios (J) en el Sistema Internacional de Unidades (SI).
- Flujo radiante: es la potencia lumínica, es decir, la energía radiante por unidad de tiempo. Puede referirse tanto a potencia emitida como recibida. Se mide en vatios (W) en el SI
- Intensidad radiante: es el flujo radiante por unidad de ángulo sólido. Se mide en vatios por estereorradián ( $\text{W/sr}$ ) en el SI
- Radiancia: es el flujo radiante por la superficie emisora y por unidad de ángulo sólido. Se mide en  $\text{W/sr}^2\text{m}^2$  en el SI
- Irradiancia: es el flujo radiante o potencia que incide sobre una superficie por unidad de área. Se mide en vatios por metro cuadrado ( $\text{W/m}^2$ ) en el SI

Las siguientes definiciones son relevantes en los estudios fotométricos (14):

- Flujo luminoso: mide la potencia de luz percibida por el ojo humano. Se pondera para reflejar la diferencia de sensibilidad del ojo humano a las distintas longitudes de onda. Se mide en lúmenes (lm) en el SI
- Intensidad luminosa: es el flujo luminoso por unidad de ángulo sólido. Se mide en candelas (cd), una de las siete unidades fundamentales del SI
- Luminancia: es la intensidad luminosa por unidad de superficie, y se utiliza en fuentes extensas. Se mide en candelas por metro cuadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) en el SI
- Iluminancia: es el flujo luminoso que incide sobre una superficie por unidad de área. Su unidad de medida en el SI es el lux, que equivale a lúmenes por metro cuadrado ( $\text{lm}/\text{m}^2$ ).

Para una mejor comprensión de los conceptos anteriores, se ha realizado la siguiente representación gráfica:

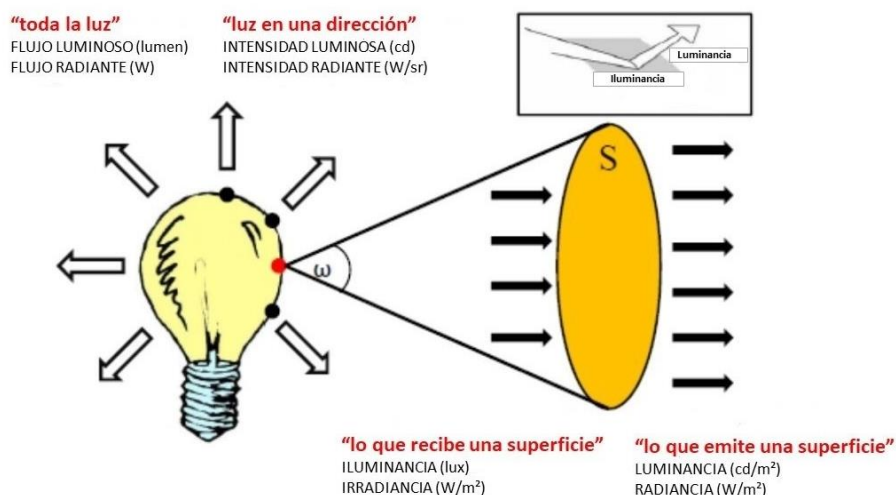


Figura 6. Magnitudes radiométricas y fotométricas. Elaboración propia.

## INTRODUCCIÓN

Para mayor facilidad, en la siguiente tabla se indican las correspondencias entre las magnitudes radiométricas y fotométricas más usuales, y sus unidades de medida:

**Tabla 2. Unidades radiométricas y fotométricas**

	Radiometría		Fotometría	
	Magnitud	Unidad	Magnitud	Unidad
	Flujo radiante	W	Flujo luminoso	lm
Fuente puntual	Intensidad radiante	W/sr	Intensidad luminosa	lm/sr= cd
Fuente extensa	Radiancia	W/sr*m <sup>2</sup>	Luminancia	lm/sr*m <sup>2</sup> =cd/m <sup>2</sup>
Superficie receptora	Irradiancia	W/m <sup>2</sup>	Iluminancia	lm/m <sup>2</sup> =lux

Abreviaturas: w=vatio; sr=estereorradián; lm=lumen; cd= candela



## 1.2 El receptor: las estructuras oculares

El sistema visual está compuesto por el siguiente conjunto anatómico y fisiológico (15):

-Globo ocular: es una estructura de forma aproximadamente esférica con un diámetro antero-posterior medio de 24 mm y un peso medio de 7,5 g que se encuentra alojado en la cavidad orbitaria. Está constituido por tres capas, en las que, desde el punto de vista topográfico y funcional, se distinguen las siguientes zonas:

- capa externa: esclera, córnea y limbo esclero-corneal.
- capa media: coroides, cuerpo ciliar e iris.
- capa interna: retina.

-Contenido del globo ocular: constituido por el cristalino, el humor vítreo y el humor acuoso.

-Órganos que rodean al globo ocular: la órbita (cavidad donde se encuentra el globo ocular, el nervio óptico, los músculos extrínsecos del ojo, los nervios y vasos orbitarios, la glándula lagrimal y el tejido adiposo), los párpados, la conjuntiva y el aparato lagrimal.

-Elementos vasculares y nerviosos, relacionados con el órgano de la visión.

-Vía óptica y los centros del sistema nervioso central relacionados con el fenómeno visual.

El ojo humano es el órgano sensorial para el proceso de la visión; en él se produce la absorción de luz y la integración de las primeras señales visuales.

La luz atraviesa los diferentes medios oculares, como la capa lagrimal, córnea, cámara anterior, cristalino y cámara posterior, hasta alcanzar la retina. Para que este proceso sea lo más óptimo posible, es necesario que todos los procesos de transmisión de la luz y acomodación se encuentren en perfectas condiciones. Por esta razón, el epitelio y el estroma corneal son transparentes para permitir el paso de luz sin distorsión (16) y el cristalino, córnea y músculos

## INTRODUCCIÓN

ciliares (mediante el proceso de acomodación) contribuyen a la correcta incidencia de luz sobre la retina (2).

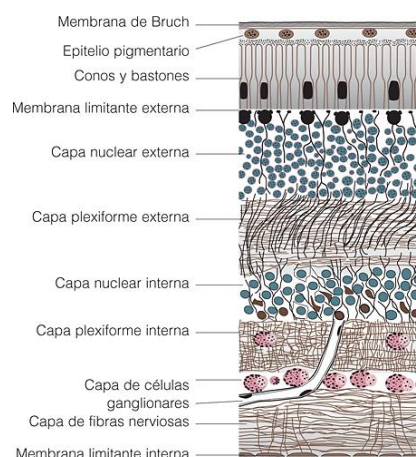
Para esta Tesis Doctoral se describirá con mayor detalle la retina, ya que su función principal es la de recibir y transducir la luz del entorno.

### 1.2.1 Retina

La retina es la capa más interna del globo ocular, situada en el polo posterior de éste.

Anatómicamente, está formada por las siguientes diez capas: epitelio pigmentario retiniano, capa de bastones y conos, membrana limitante externa, capa nuclear externa, capa plexiforme externa, capa nuclear interna, capa plexiforme interna, capa de células ganglionares, capa de las fibras del nervio óptico, y membrana limitante interna.

La luz, primero traspasa el sistema óptico de dioptrios oculares y el humor vítreo, y más tarde se introduce en la retina. Como es sabido la retina humana es invertida; en primer lugar, se encuentra con las células ganglionares, posteriormente atraviesa las capas plexiformes, nucleares interna y externa accediendo finalmente a la capa de fotorreceptores (bastones y conos).



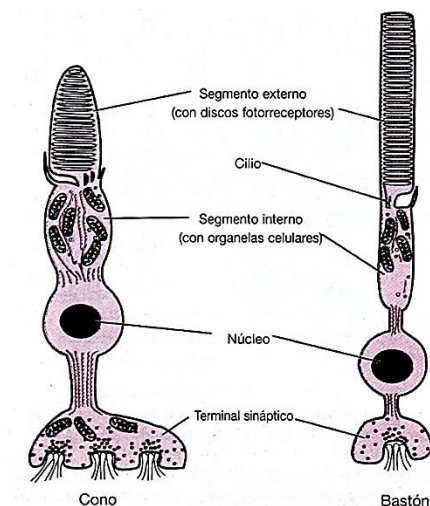
**Figura 7. Esquema ilustrativo de las capas de la retina. Tomado de [www.accessmedicina.com](http://www.accessmedicina.com)**

El **epitelio pigmentario** constituye la última estructura retiniana. Está formado por una única capa de células hexagonales, unidas fuertemente entre sí; su citoplasma contiene múltiples melanosomas y gránulos de lipofucsina. Tiene funciones de máxima importancia, entre las que resaltan su capacidad de almacenaje de vitamina A y melanina y su labor fagocítica de parte del segmento

externo de los fotorreceptores. Su membrana basal forma parte de la membrana de Bruch de la coroides; por el otro extremo, las proyecciones vellosas del ápice celular rodean los segmentos externos de los fotorreceptores.

En la **capa de fotorreceptores** se encuentran los conos y bastones, las células responsables de la absorción de la radiación electromagnética del espectro visible y de su transformación en impulso bioeléctrico.

El número y la distribución de los dos tipos de fotorreceptores es desigual en la retina. Un ojo humano comprende alrededor de 120.000.000 de bastones localizados principalmente en la periferia. En correspondencia a los conos el número total es cercano a 6.200.000.



Los dos tipos de fotorreceptores consisten, básicamente, en un segmento externo, un segmento interno y el cuerpo celular. El diámetro de los bastones es de entre 2 y 5 micras, mientras que el de los conos es de 5 a 8 micras, excepto los localizados en la fóvea, que es de tan sólo 1,5 micras.

**Figura 8. Estructura de los fotorreceptores.**

Tomado de <http://www.investigacionyciencia.es>

La fóvea, situada en el centro retiniano, abarca un área total de aproximadamente un 1 mm<sup>2</sup>. Su principal función es la visión pormenorizada o en detalle. La parte central de la fóvea se denomina foveola central, ocupa tan solo 200 micras de diámetro (17) y está compuesta principalmente de conos (su estructura distingue tanto de la retina periférica como de la retina central).

## INTRODUCCIÓN

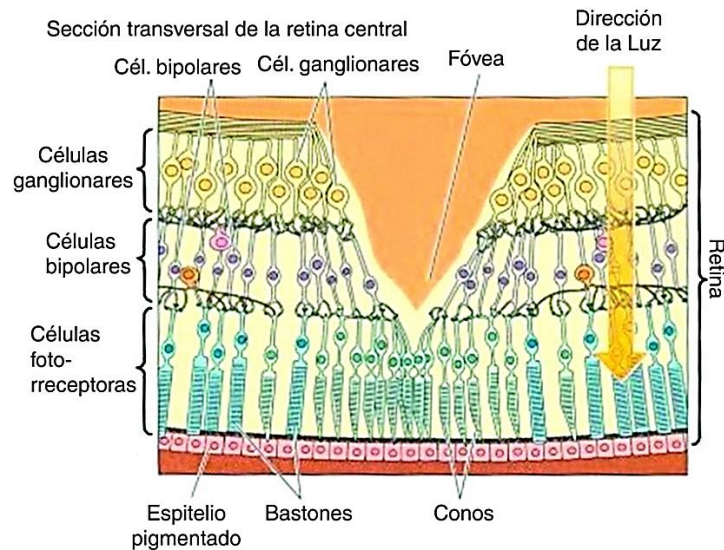


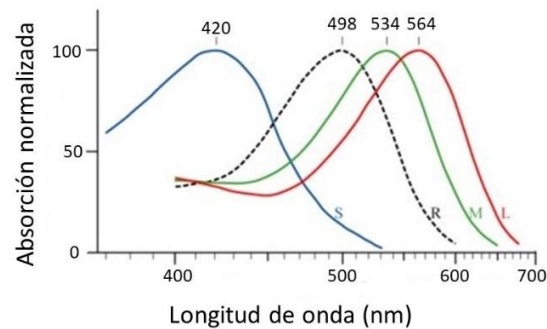
Figura 9. Sección transversal de la retina central. Tomado de <http://www.elsevier.es>

El segmento externo de los fotorreceptores, en contacto con las proyecciones vellosas del ápice celular del epitelio pigmentario, contiene múltiples discos (donde se localiza el pigmento fotosensible) en renovación constante, que son fagocitados por este tejido. El segmento externo conecta con el interno mediante un cilio de unión. El segmento interno posee un número elevado de mitocondrias y glucógeno; continúa para formar el cuerpo celular o prolongación externa, donde se localiza el núcleo, y termina en el cuerpo sináptico, donde se produce la sinapsis entre los fotorreceptores y las células bipolares y horizontales, en la capa plexiforme externa.

Aunque la estructura de los segmentos externos de los conos es similar a la de los bastones, existen varias diferencias importantes entre estos dos tipos de fotorreceptores. Por una parte, los discos de los conos están unidos a la membrana celular, mientras que en los bastones no. Por otra parte, el pigmento fotosensible que contienen los discos de los segmentos externos es muy distinto. Los bastones contienen rodopsina en una elevada concentración, cuyo máximo espectral se produce a 498 nm (luz verde-azulada), mientras que los conos contienen uno de los siguientes tres tipos distintos de pigmento fotosensible, en una concentración inferior a la de los bastones: eritrolabe, clorolabe o cianolabe. Se distinguen, por tanto, tres tipos de conos según su coeficiente de sensibilidad

espectral máximo: conos L-sensibles a longitudes de onda larga, conos M-sensibles a longitudes de onda media y conos S-sensibles a longitudes de onda corta.

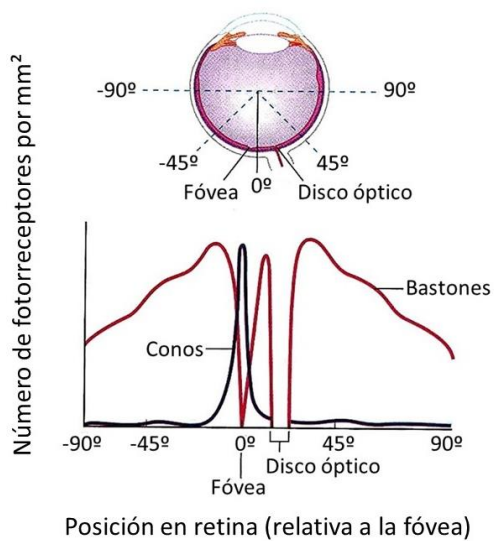
Estas características espectrales de los tres tipos de conos constituyen la base de la visión tricromática. Al contrario de lo que ocurre con la rodopsina de los bastones, el umbral de sensibilidad a la luz de los tres fotopigmentos de los conos es elevado (baja sensibilidad), por lo que su estimulación requiere un nivel de iluminación alto (fotópico  $> 100 \text{ cd/m}^2$ ).



**Figura 10. Absorción espectral de los conos (S, M y L) y los bastones (R). Tomado de <http://psychology.wikia.com/wiki/Photopsin>**

La mayor concentración de conos se encuentra en la fóvea, y decrece rápidamente hacia la periferia, mientras que la máxima densidad de bastones se localiza a 18-20 grados de la fóvea, disminuyendo su número hacia la retina central, hasta su anulación en la fóvea. Además, es de interés reseñar que la correspondencia de conos L, M y S no es uniforme. La retina central presenta 5.500.000 de conos L y M, sin embargo la retina paracentral y la retina periférica contienen los 700.000 conos S. Por último, la papila, lugar de salida de las fibras nerviosas desde el ojo hacia la vía visual, no contiene ningún tipo de fotorreceptor; de ahí su denominación de “mancha ciega” (18).

## INTRODUCCIÓN



**Figura 11. Distribución de conos y bastones en la retina.**

Los conos operan con niveles de iluminación altos (rango fotópico) y son los encargados de una resolución espacial y sensibilidad al contraste impecables, así como de la percepción de los colores. Por el contrario, los bastones operan con niveles de iluminación muy bajos (rango escotópico) y son responsables de una visión poco discriminativa, acromática y con una sensibilidad al contraste muy pobre, aunque con una gran sensibilidad a la iluminación. Con niveles de iluminación intermedios (rango mesópico) tanto los conos como los bastones contribuyen a la respuesta visual. En comparación con un nivel de iluminación fotópico, en la zona de transición mesópica, la visión del color disminuye debido a la disminución de las señales de los conos; la calidad de la imagen retiniana empeora como consecuencia del mayor tamaño de la pupila; y la sensibilidad al contraste y la resolución espacial empeoran sustancialmente debido a la contribución de las señales de los dos tipos de fotorreceptores.

La **membrana limitante externa** corresponde a las uniones de los fotorreceptores a las células de Müller. En la **capa nuclear externa** se encuentran los núcleos de los fotorreceptores.

La sinapsis entre los fotorreceptores y las células bipolares se efectúa en la **capa plexiforme externa**. En la **capa nuclear interna** se encuentran los

La disposición de fotorreceptores en un corte horizontal de la retina ayuda a comprender su funcionalidad visual.

En la retina hay una densidad constante de conos (alrededor de 14.000 fotorreceptores/mm<sup>2</sup>), salvo en la fóvea donde de forma concreta el valor se aumenta hasta 180.000 fotorreceptores/mm<sup>2</sup>.

núcleos de las células bipolares, horizontales y amacrinas, que hacen sinapsis en la **capa plexiforme interna**. La **capa de células ganglionares** está formada por los núcleos de estas células y la capa de fibras nerviosas por sus axones. Por último, la **membrana limitante interna** separa la retina del vítreo.

### 1.3 Interacción emisor-receptor

El ojo es el órgano encargado de recibir, transmitir la luz del medio ambiente y procesar en la retina parte de la información recibida. De las principales funciones del sistema visual humano destacan: la capacidad de resolver espacialmente detalles pequeños, la adaptación a los cambios de luz, la alta sensibilidad a estímulos luminosos, la discriminación de un gran número de tonalidades, así como el enfoque y la captación de objetos en movimiento entre otras muchas características imprescindibles en el funcionamiento adecuado de la visión. De todas las características del sistema visual expuestas anteriormente, en esta Tesis Doctoral se quiere hacer hincapié sobre la capacidad que tiene el sistema visual humano para adaptarse a un rango de intensidades de luz muy amplio. Éste es capaz de operar sobre un rango de 12 unidades logarítmicas, extendiéndose desde la iluminación ambiental producida por la luz de la luna hasta la iluminación que proporciona el sol brillante (19).

Como se ha detallado en el apartado anterior, los procesos de adaptación a la luz involucran a los dos tipos de fotorreceptores visuales. Los conos actúan a niveles elevados de luz (visión fotópica) y son los encargados de la percepción del color, de la resolución espacial y de la sensibilidad al contraste óptima (20). En contraste, los bastones que actúan a niveles de luz muy bajos (visión escotópica), con una resolución espacial baja, un procesamiento lento y una sensibilidad al contraste pobre (21, 22).

Se ha realizado un breve resumen de los niveles de iluminación ambiente a los que puede estar expuesto un ser humano, para la mejor comprensión de este documento. Estos valores han quedado establecidos, a partir del 2010, por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) en (23):

-escotópico:  $< 5^{-3} \text{ cd/m}^2$

-mesópico:  $5^{-3} \text{ cd/m}^2 - 5 \text{ cd/m}^2$

-fotópico:  $> 5 \text{ cd/m}^2$



**Iluminación ambiente escotópica:** este tipo de iluminación se limita al umbral máximo de  $0,005 \text{ cd/m}^2$ . Bajo estas condiciones, solo los fotorreceptores bastones son susceptibles de activarse (24). Dada esta circunstancia, se pierden casi por completo características de la visión como pueden ser la discriminación de los objetos, así como su color.

**Iluminación ambiente mesópica:** para fijar los límites inferior y superior de luminancia en este tipo de iluminación ha existido siempre disparidad de criterios (24). Algunos autores establecieron el límite superior en  $5 \text{ cd/m}^2$  (25) y otros en  $10 \text{ cd/m}^2$  (19, 26). En la actualidad, se consideran las cifras de la CIE (límites comprendidos entre de  $0,005 \text{ cd/m}^2$  y  $5 \text{ cd/m}^2$ ) (23). En estas condiciones, los fotorreceptores conos y bastones están activados, con distinto grado de participación. Con respecto a la visión, el color se percibe con más dificultad al igual que la discriminación de los objetos.

**Iluminación ambiente fotópico:** según los criterios actuales, este nivel de iluminación se caracteriza por niveles de luminancia superiores a  $5 \text{ cd/m}^2$ . Al contrario que en el ambiente escotópico, son los fotorreceptores conos los que se encuentran activados. En este nivel, la visión humana percibe, los colores y los detalles de los objetos con elevada resolución espacial (20).

### 1.3.1 Sensibilidad espectral del sistema visual

El sistema visual, presenta una sensibilidad espectral diferente para distintas longitudes de onda. Es un receptor selectivo para cada longitud de onda (2). Es decir, el sistema visual humano presenta, para un mismo flujo radiante de dos estímulos de longitud de onda diferentes, una respuesta muy distinta percibiéndolos con distinto color y claridad, en función de la iluminación ambiente. La caracterización espectral del sistema visual como receptor de energía radiante se realiza mediante la determinación de la curva de eficiencia luminosa relativa espectral o curva de visibilidad espectral relativa, que se representa por  $V(\lambda)$ . Esta sensibilidad se refiere únicamente al atributo de la luminosidad o claridad. La luminosidad se utiliza para fuentes de luz, y se emplea

## INTRODUCCIÓN

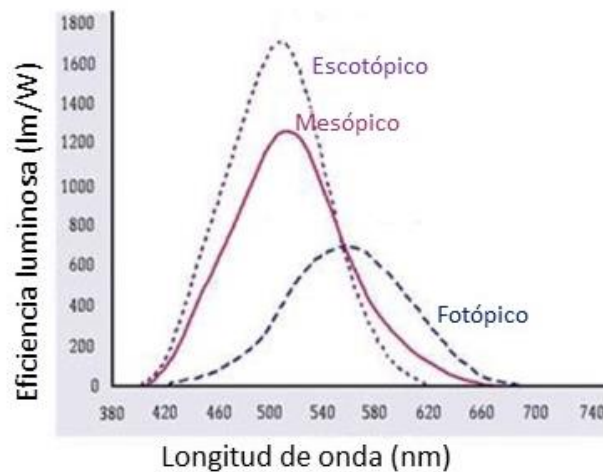
tanto para objetos opacos como para transparentes. La claridad se refiere a la sensación luminosa producida en un observador patrón. Por lo tanto, a partir de la función  $V(\lambda)$ , se puede saber cuál es el estímulo cromático que proporciona una mayor sensación de claridad, o la energía que debe tener un estímulo para obtener una determinada sensación de claridad (2).

La curva de eficiencia luminosa espectral varía según el método de determinación empleado: comparación heterocromática directa, paso a paso, mínimo parpadeo, mínimo borde distinguible, determinación del umbral absoluto, etc.

Adicionalmente, con el envejecimiento se produce una disminución progresiva de la sensibilidad espectral debido a los cambios neuronales y ópticos que se producen con la edad (27), como son, respectivamente, entre otros: la pérdida de bastones y la reducción de la densidad de conos en la fovea (28), la disminución del número de células ganglionares (29); los cambios en la morfología de los fotorreceptores (30); el incremento de la absorción por las diferentes estructuras oculares, en especial el cristalino; la disminución del tamaño de la pupila y el incremento del scattering intraocular, que rebajan el nivel absoluto de radiación que llega a los fotorreceptores (31).

Otro parámetro, quizá el más determinante, que condiciona la curva de eficiencia luminosa espectral, es el nivel de iluminación.

Por todo lo anteriormente expuesto, se tuvo la necesidad de alcanzar acuerdos internacionales y concretar las diferentes curvas de sensibilidad espectral. Éstas fueron recogidas por la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE: *Commission Internationale de l'Eclairage*): una en condiciones de iluminación fotópica (CIE 1924) (32), otra en condiciones de iluminación escotópica (CIE 1951) (33) y, en el año 2010, la correspondiente a las condiciones mesópicas (23).

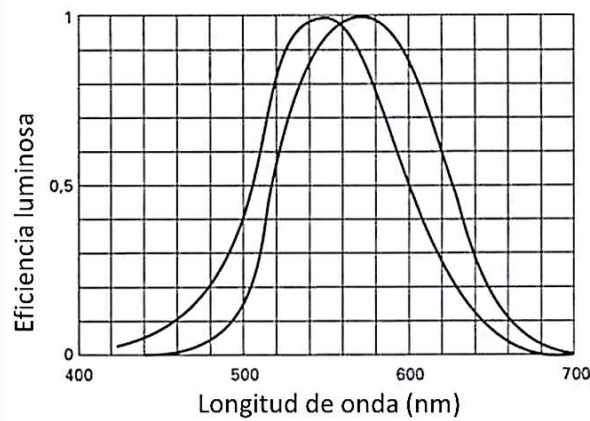


**Figura 12.** Curvas de eficiencia luminosa espectral relativa para el observador patrón CIE en condiciones fotópicas, mesópicas y escotópicas, para el espectro visible. Tomado de Sánchez-Ramos, 2010.

Como se observa en las curvas anteriores, en condiciones de iluminación fotópica, el máximo de sensibilidad corresponde a la longitud de onda de 555 nm (intervalo verde-amarillo), y se desplaza a los 507 nm (intervalo azul-verde) en condiciones escotópicas (34). En situación mesópica, la sensibilidad del sistema visual es intermedia entre las dos anteriores.

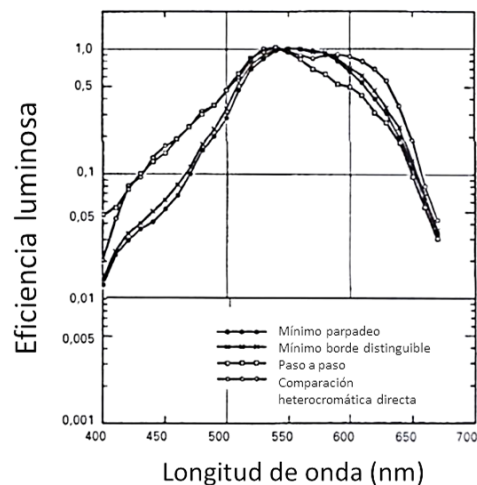
En condiciones de iluminación alta (fotópica), los conos son los encargados de la resolución espacial y de la sensibilidad al contraste óptimas, así como de la visión del color. Sin embargo, en condiciones de iluminación baja (escotópica) operan los bastones, acromáticos, que ofrecen una discriminación de detalles y una sensibilidad al contraste pobres (2). En la siguiente figura se muestran las curvas de sensibilidad espectral fotópica y escotópica para un observador patrón que están relacionadas con los dos tipos fotorreceptores que presenta el sistema visual humano.

## INTRODUCCIÓN



**Figura 13. Curva de eficiencia luminosa fotópica y escotópica. Coblenz y Emerson (1918). Tomado de Artigas, 1995.**

Por último, la visión mesópica, que abarca un rango de luminancias de 4 unidades logarítmicas, describe el paso desde la activación de los bastones hasta la de los conos (o viceversa); por tanto, los dos tipos de fotorreceptores contribuyen a la respuesta visual.



**Figura 14. Curvas de eficiencia luminosa mesópica, según Wagner y Boynton (1972), obtenidas con diferentes métodos de igualación. Tomado de Artigas, 1995.**

Debido a la reducción de las señales de los conos, la visión del color, la resolución espacial y la sensibilidad al contraste se deterioran progresivamente según disminuye el nivel de iluminación (19, 22).

Adicionalmente, debido a los cambios en el diámetro pupilar, la calidad de la imagen retiniana empeora como consecuencia de las aberraciones y de la

dispersión de la radiación. Por el contrario, la sumación espacial de las señales de los bastones incrementa la sensibilidad luminosa, que se desplaza hacia longitudes de onda más cortas (2).

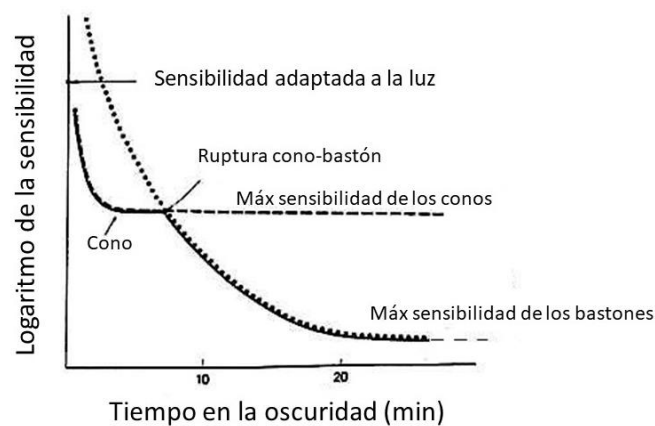
### 1.3.2 Adaptación a la oscuridad

El ojo presenta una importante capacidad de adaptarse a distintos grados de iluminación. Varios son los mecanismos que permiten adaptarse a la oscuridad; en primer lugar, la adaptación mecánica producida por el ajuste de la entrada de luz al interior del ojo, que está regulada por la pupila pudiendo producirse midriasis o miosis; en segundo lugar, destaca la adaptación bioquímica que se produce fundamentalmente en los fotorreceptores retinianos y, en tercera instancia, la adaptación neuronal que procesa y regula los cambios que se producen a todos los niveles en el sistema visual (35).

La curva de adaptación a la oscuridad se constituye mediante los valores del umbral absoluto de luminancia para diferentes longitudes de onda. Entendido el umbral, como valor mínimo de luz en términos radiométricos (energía) o fotométricos (luminancia) necesario para que se perciba un estímulo con la menor cantidad de energía o luminancia (2).

En la siguiente figura se puede observar la curva de adaptación a la oscuridad (línea continua) en dos etapas: una rama debida a la adaptación de los conos (rayas discontinuas) y una segunda rama proporcionada por la adaptación de los bastones (puntos discontinuos).

## INTRODUCCIÓN



**Figura 15. Curva de adaptación a la oscuridad (línea continua). La curva discontinua de puntos corresponde a los bastones y la de rayas a los conos. Tomada de Rushton (1961).**

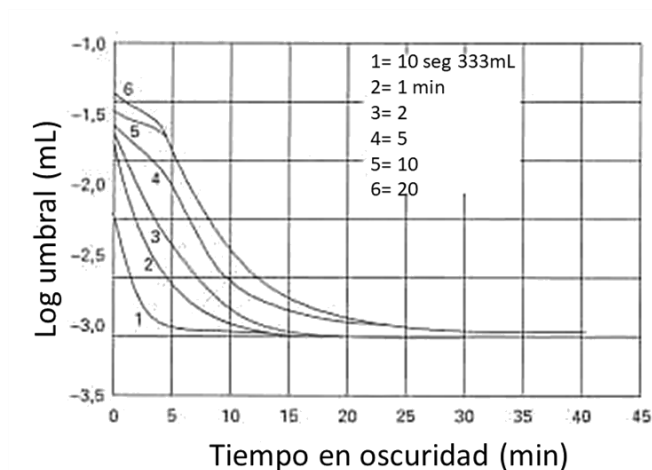
La determinación del umbral absoluto se puede llevar a cabo por diversos métodos:

- Método directo: incrementos y detrimentos sucesivos de la luminancia ( $L$ ), hasta que el test se perciba y desaparezca claramente encontrando un valor límite entre las luminancias perceptibles y no perceptibles.
- Método de los límites: la luminancia aumenta de forma continua desde cero hasta que se obtiene la menor cantidad perceptible y viceversa. Se repite la operación un cierto número de veces y se obtiene el umbral medio.
- Método de los estímulos constantes: se realiza un ensayo en el que se fijan de antemano diferentes valores de luminosidad en el rango visible y se determina probabilísticamente el umbral a partir de aquella luminancia que presenta una probabilidad de 0,5.

El umbral absoluto de luminancia está afectado por una serie de factores en las condiciones de observación como son el estado de adaptación previo, el

tamaño del test, la localización retiniana de la imagen, el tiempo de exposición del test y su longitud de onda o cromaticidad.

En la gráfica expuesta a continuación se muestra la enorme variabilidad de la curva básica de adaptación a la oscuridad en función del estado de preadaptación.



**Figura 16. Curvas de adaptación a la oscuridad para diferentes duraciones de las preadaptaciones a 333 mHz. Tomado de Wald y Clarck, 1937.**

La curva de adaptación a la oscuridad se ve también afectada por las variaciones de tamaño del test siempre que se mantenga constante la excentricidad, es decir la localización retiniana. Se produce un efecto de sumación total o ley de Ricco que afecta exclusivamente a la retina periférica. Así mismo en la curva de adaptación a la oscuridad el incremento de tiempo tendría una respuesta similar al incremento de tamaño, y un comportamiento simétrico entre ellos (2).

Se comprueba que el tiempo requerido para una óptima sensibilidad es muy elevado; es decir, el sistema de conos se adapta durante 7 u 8 minutos y permite posteriormente el procesamiento de la señal luminosa por el sistema de bastones que realmente estará totalmente adaptado a las condiciones mesópicas en un tiempo aproximado de entre 15 y 30 minutos.

### 1.3.3 Función visual

La función visual se puede definir como la capacidad de un sujeto para recoger, integrar y dar significado a los estímulos luminosos que recibe de su entorno (36). Dentro del elevado número de parámetros que caracterizan la función visual, en este apartado se describen únicamente aquellos que, como se comenta en otros apartados de esta Tesis Doctoral, se han considerado más relevantes para la población diana de este estudio: los conductores.

#### 1.3.3.1 Agudeza visual

Las funciones básicas del sistema visual son la detección, el reconocimiento y la discriminación de un estímulo en el campo visual. A pesar de que existe un acuerdo unánime en aceptar que la visión es mucho más que agudeza visual espacial, resolución espacial o visión de las formas, la agudeza visual estática continúa siendo el parámetro visual más importante y, por tanto, más frecuentemente evaluado y analizado a nivel clínico. Se puede definir la agudeza visual como la capacidad de percibir y diferenciar dos estímulos separados por un ángulo determinado ( $\alpha$ ), es decir, la mínima distancia que existe entre dos puntos que el ojo puede distinguir como diferentes. Se trata, por tanto, de la capacidad de resolución espacial del sistema visual (37).

La resolución espacial del sistema visual es una función compleja en la que es necesario considerar diferentes conceptos como (38):

- Mínimo visible: es la unidad espacial más pequeña que el sistema visual es capaz de percibir. Corresponde al objeto más pequeño diferenciable. Se designa así a la capacidad de discernir un objeto elemental sobre su fondo. Con proximidad corresponde a 36 segundos de arco, que es el mínimo ángulo que permite estimular a dos conos separados por un tercero.
- Mínimo separable o resolución: definido por la capacidad de ser percibidos como separados dos elementos muy próximos en un test. El valor de separación mínimo es, a menudo, usado para



evaluar la calidad de los sistemas ópticos, y consecuentemente, puede ser utilizado para medir la capacidad de resolución del sistema visual humano. Se localiza aproximadamente en un valor angular de 50 a 94 segundos de arco.

- Mínimo reconocible: es la interrupción más pequeña entre dos puntos que se puede apreciar. Se establece como el detalle espacial ínfimo que puede ser detectado, discriminado o identificado. Este mínimo reconocible es lo que comúnmente se denomina “agudeza visual”. Se estudia, habitualmente, con optotipos.

Un optotipo se puede definir como una figura o símbolo que se emplea para valorar aspectos de la función visual. En su estructura se considera los principios fisiológicos de la agudeza visual. La imagen está formada por varios rasgos, los cuales deben subtender un ángulo determinado y una distancia dada (39).

Matemáticamente, la agudeza visual se cuantifica mediante el valor del inverso del ángulo visual ( $\alpha$ ), expresado en minutos de arco, que subtiende el mínimo detalle del optotipo que se debe reconocer.

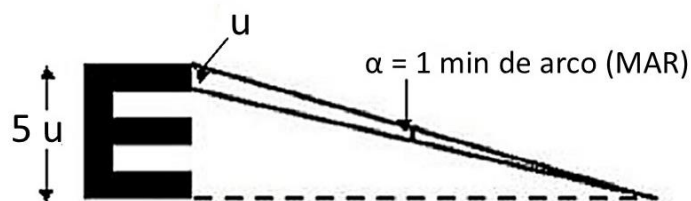


Figura 17. Optotipo “E” de Snellen. Adaptado de Pérez Carrasco, 2006.

En el optotipo, el límite de resolución o mínimo ángulo de resolución (MAR) es de un minuto de arco ( $1'$ ) para un valor del trazo de la letra ( $u$ ) de 1,75 mm, a una distancia de observación de 6 metros. El tamaño de la letra completa

## INTRODUCCIÓN

es 5 veces el valor del trazo. Por tanto, para una agudeza visual unidad, a una distancia de 6 metros, la letra completa mide 7,25 mm, subtendiendo un ángulo de 5 minutos de arco (39).

En las últimas décadas ha habido una evolución de las diferentes notaciones para registrar la agudeza visual, a continuación, se muestran las principales que se pueden encontrar en la bibliografía.

**Notación decimal:** es la inversa del ángulo que subtiende un objeto expresado en minutos, su valor es un número decimal que será igual a 1 cuando el ángulo sea igual a 1 minuto. El valor  $AV=1$  se toma como valor normal de la agudeza visual. En la práctica, los test se diseñan de manera que el menor detalle del test sea  $1/5$  del tamaño del test. La notación decimal transforma la fracción de Snellen, de la que se comentará a continuación, en una cantidad decimal. Así, 20/20 (o 6/6) se transforman a 1,0; 20/200 (6/60) pasan a ser 0,1; 20/40 (6/12) en 0,5. La notación decimal está más extendida en el continente europeo; se reduce a dar un número para cuantificar un ángulo (38).

**Fracción de Snellen:** la fracción de Snellen expresa el tamaño angular de los optotipos especificando la distancia de prueba y la altura de las letras. Se escribe con la distancia de prueba como numerador y el tamaño de letra como denominador:  $AV = (\text{distancia del test}) / (\text{distancia del test al que subtiende } 5' \text{ de arco})$ . Por ejemplo, un resultado de agudeza visual de 20/200 significa que la distancia de prueba fue de 20 pies y que las letras más pequeñas que pueden ser leídas subtenderían 5 minutos de arco a una distancia de 200 pies. A condición de que la imagen retiniana sea mantenida en el foco, la agudeza visual no debería cambiar con la distancia de prueba. Así, a 20/200, 40/400, 10/100, 5/50, y 6/60 son todos apuntes de agudeza visuales que representan el mismo ángulo (las cartas subtienden 50 minutos de arco); las distancias de prueba y los tamaños de letra umbral son diferentes, pero mantienen la proporción. En los Estados Unidos, las distancias son expresadas en pies, y los clínicos casi invariablemente usan la fracción de Snellen con 20 pies como numerador. En la mayor parte de otros países, las unidades métricas son usadas, con 6 m que es

la distancia más común de prueba. Así, el 20/20 es equivalente a 6/6, 20/25 a 6/7,5, 20/40 a 6/12, 20/100 a 6/30, 20/200 a 6/60 (38).

**Mínimo Ángulo de Resolución:** el MAR (Minimun Angle Resolution) está expresado en minutos del arco, e indica el tamaño angular del detalle crítico dentro del optotipo. Para las letras, el detalle crítico es tomado como un quinto de la altura de la letra. Para una agudeza visual de 20/20 (o, en unidades métricas, 6/6), el MAR es igual a 1 minuto de arco. Para una notación 20/40 (o 6/12), el MAR es de 2 minutos de arco; para una notación de 20/200 (o 6/60), el MAR correspondiente es 10 minutos de arco. El MAR en minutos del arco es igual al recíproco del valor de agudeza decimal (38).

**Logaritmo del Mínimo Ángulo de Resolución:** el logaritmo de MAR (logMAR) es el logaritmo decimal de MAR. Cuando la agudeza visual es 20/20 (o 6/6), MAR es igual a 1 minuto de arco entonces el logMAR es igual a  $\log_{10} 1,0$  que es 0,0. Para una notación 20/40 (o 6/12), el MAR es 2 minutos de arco luego logMAR es  $\log_{10} 2,0 = 0,30$  y por último para una notación de 20/200 (o 6/60), el MAR es de 10 minutos de arco, y el logMAR corresponde a 1,0. Cuando el resultado de agudeza visual es mejor que 20/20 (o 6/6), el logMAR se vuelve negativo. Para optotipos que tienen una proporción de progresión de tamaño 0,1 unidades y cinco letras por fila, a cada letra se le puede adjudicar un valor de 0,02 en la escala logMAR (38, 40).

Debido a la importancia de la valoración de la agudeza visual para esta Tesis Doctoral se ha querido, en esta introducción, hacer un resumen expositivo de los diferentes tipos de elementos que pueden ser utilizados para valorar la agudeza visual. Así pues, en los siguientes párrafos se van a enumerar y explicar brevemente los optotipos más comunes en la praxis habitual.

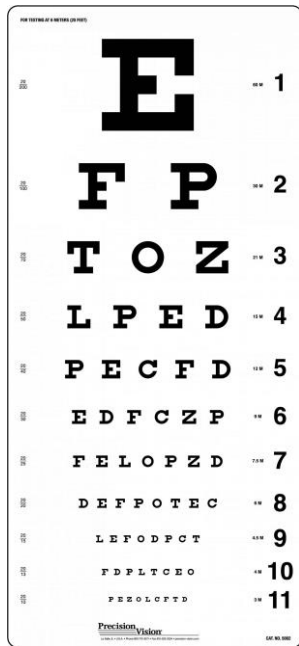


Figura 18. Optotipo de Snellen. Tomada de [www.precision-vision.com](http://www.precision-vision.com)

Desde 1889 se utiliza un optotipo clásico denominado “anillo de Landolt” o “**C de Landolt**”. Se trata de un círculo con una apertura en el mismo. El diámetro externo del anillo es cinco veces la anchura del trazo del círculo mientras que el diámetro interno mide tres veces el ancho del trazo. La abertura presenta el mismo ancho que el trazo.

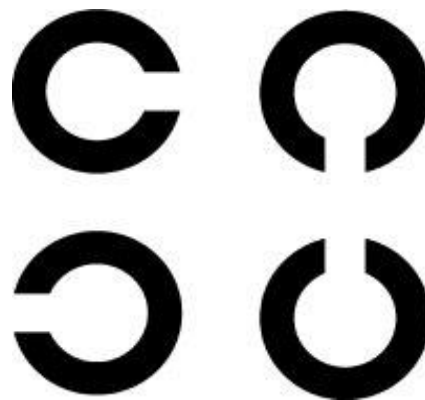


Figura 19. “C de Landolt” Tomada de [www.medical-dictionary.com](http://www.medical-dictionary.com)

**Carta de Snellen:** consta de siete niveles de tamaños decrecientes. En el primer nivel presenta una única letra y en los siguientes niveles disminuye progresivamente el tamaño de las letras y aumenta el número de optotipos. A lo largo del tiempo se han realizado diversas modificaciones del diseño original de Snellen, tales como la selección y diseño de las letras, las progresiones del tamaño, las relaciones de espaciamiento y el número de letras por nivel;

Su influencia ha sido tan importante que aun hoy en día se aplica el término “Optotipo de Snellen” a los test que presentan una sola letra en la parte superior y que progresan a mayor número en los sucesivos niveles.

Para realizar la mayor parte de pruebas usando los optotipos de Landolt se muestra la abertura en diferentes posiciones alternativas. La tarea del observador es determinar la posición de la abertura para cada anillo de Landolt

presentado. A diferencia de la mayor parte de otros optotipos, el detalle crítico en el anillo de Landolt (abertura) está bien definido siendo su tamaño un quinto de la altura del optotipo (38). Una importante revolución en el diseño de optotipos para la valoración de la agudeza visual fue la propuesta de **Bailey y Lovie** en 1976. Sus trabajos sugieren un conjunto de normas aplicables en cada nivel de tamaño, por lo que realmente la única variable significativa que se modifica de un nivel al siguiente es el tamaño.

Esta normalización necesita de los siguientes requisitos (40): progresión logarítmica de tamaño, paridad en el número de optotipos en cada nivel de tamaño, espaciado entre las letras y las filas proporcional al tamaño de la letra y similar legibilidad media de los optotipos en cada nivel de tamaño. Aunque se han propuesto diferentes gradientes de escala la más habitual es aquella que utiliza una progresión de 0,1 (41).



**Figura 20. Optotipo de Bailey – Lovie. Tomada de [www.precision-vision.com](http://www.precision-vision.com)**

Junto con estos principios de diseño gráfico, se introdujo la puntuación clínica de la agudeza visual en unidades logMAR así como un método para dar un valor adicional igual para cada letra extra que se lee correctamente.

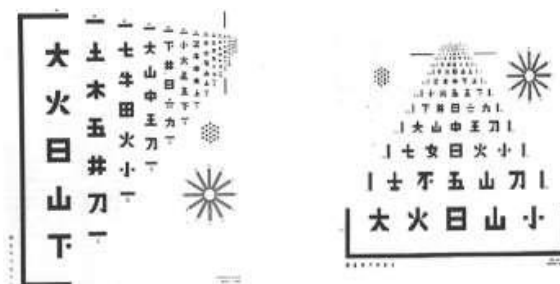
Varios modelos de test se han desarrollado conforme a los principios propuestos por Bailey-Lovie. Destacan los test de Taylor (42), Ferris (43) y el test ETDRS enfocado al estudio del diagnóstico precoz de la retinopatía diabética.

Cuando se precisa exactitud y reproducibilidad de las medidas, se utilizan optotipos ETDRS, único formato validado, estandarizado y aceptado para estudios clínicos patrocinados por el National Eye Institute estadounidense y que la Food and Drug Administration (FDA) exige utilizar (44, 45). Los optotipos

## INTRODUCCIÓN

ETDRS se desarrollaron para la primera fase del estudio Early Treatment Diabetic Retinopathy Study and Visual Acuity Impairment Study. Por la mayor precisión y exactitud y menor variabilidad en las medidas que se obtienen con estos optotipos en comparación con otros (como el Snellen), se han convertido en el “patrón de oro” para la determinación de la agudeza visual en investigaciones clínicas (44-49). Para el estudio de esta Tesis Doctoral se han utilizado optotipos ETDRS.

Se desarrollaron también y se utilizan actualmente optotipos con los requerimientos Bailey-Lovie con caracteres de distintos alfabetos: como puede ser el chino (50).



**Figura 21. Optotipos de agudeza visual china con progresión logarítmica para ser leídas de arriba a abajo y de derecha a izquierda. Tomado de Woo, 1980.**

La agudeza visual se ve limitada por factores fisiológicos como la difracción, las aberraciones y la densidad de los fotorreceptores en el ojo (39, 51). Aparte de estas limitaciones, existen factores que afectan también a la agudeza visual, tales como los errores de refracción, la iluminación, el contraste y la excentricidad de la estimulación en la propia retina. Los límites de la agudeza visual, son impuestos por factores ópticos, neuronales y/o por su combinación. En el ojo normal, las limitaciones impuestas por los factores ópticos y neurales son de una magnitud similar (37).

Además la agudeza visual también se ve afectada por factores físicos, como la iluminación de la sala, la tipografía de los optotipos, su iluminación, su color y su contraste, o la distancia de éstos al observador (44).

Con respecto a la iluminación, la agudeza visual aumenta con la luminancia. Con valores inferiores a 0,04 cd/m<sup>2</sup> (límite mesópico), la agudeza visual se mantiene prácticamente constante y muy baja; a partir de este nivel de iluminación, la agudeza visual mejora progresivamente hasta alcanzar un valor

máximo, que se mantiene casi constante a partir de unas 100 cd/m<sup>2</sup> (iluminación fotópica) (52, 53).

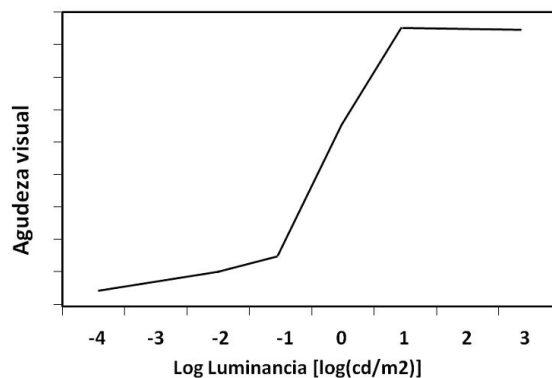


Figura 22. Variación de la agudeza visual en función de la luminancia. Tomado de Cuiña, 2003.

Debido a la gran variedad de instrumentos utilizados en clínica para la valoración de la agudeza visual con diferentes condiciones de iluminación y a la dificultad de conseguir el mismo nivel de luminancia para todos ellos que permita la comparación de resultados, se han establecido unos rangos de iluminación ambiente para valorar esta variable.

Los paneles de agudeza visual pueden ser preparados de forma impresa, con diapositivas o tarjetas que se proyectan sobre una pantalla o superficie y sistemas de video. A continuación, se ha realizado un resumen de las distintas posibilidades de presentación de los optotipos de agudeza visual.

**Paneles de caracteres impresos:** este tipo de paneles vienen manufacturados y diseñados de muy diversas formas. Muchos están impresos en cartón opaco o plástico, siendo estos directamente iluminados. Otros se colocan en un artefacto a modo de panel sólido que les ofrece retroiluminación. Los diferentes tamaños de impresión de los caracteres están, obviamente asociados a la distancia en pies o en metros en que las letras subtenden 5 minutos de arco. En general, como ya se ha comentado, la mayoría de los paneles han de exponerse a 20 pies o 6 metros, registrándose la agudeza en fracción de Snellen.

**Paneles proyectados en alguna superficie:** la principal ventaja radica en que el tamaño angular de los optotipos es independiente de la distancia de proyección, aunque se siguen recomendando distancias superiores a 5m. De este modo, si se establecen unas condiciones de observación a 20 pies o 6 m y el proyector se posiciona apropiadamente con respecto a la pantalla, se puede utilizar directamente la fracción de Snellen.

**Paneles sobre pantallas en las Tecnologías de la Información y de la Comunicación (TICs):** con el despunte de las nuevas Tecnologías de la Información y de la Comunicación (NTICs o TICs sencillamente), las pantallas donde se visionan paneles de agudeza visual están insertándose en el ámbito clínico. Entre sus opciones, se encuentra la de seleccionar entre diversos optotipos, elegir tipo de letra y secuencias, y variar parámetros como el contraste o los tiempos de presentación, con la ventaja de que se pueden registrar los datos de forma computarizada. Existen, eso sí, algunas limitaciones de brillo en el que los valores de luminancia están por debajo de  $150 \text{ cd/m}^2$ , aunque en los aparatos actuales la luminancia de la pantalla puede llegar hasta  $300 \text{ cd/m}^2$ . Los tamaños de los píxeles, en cualquier caso, limitan el diseño de estímulos extremos. Hoy en día, se puede disponer de pantallas que posean una resolución de, al menos,  $1600 \times 1200$  píxeles (UXGA).

En consecuencia, se debe considerar que los distintos tipos de paneles son muy dispares desde el punto de vista de la iluminación. En condiciones fotópicas, se establece de manera práctica un rango de tolerancia clínica que se encuentra entre  $80$  y  $320 \text{ cd/m}^2$ , además se considera válido para estandarizar el nivel de luminancia tolerar una desviación máxima del 15% respecto a las condiciones medias. Las medidas admitidas en un contexto clínico están en torno a  $160 \text{ cd/m}^2$ ; siendo el requisito británico más restrictivo que requiere de una iluminación de al menos  $120 \text{ cd/m}^2$  (53).

En la mayoría de las ocasiones, la agudeza visual se mide en condiciones fotópicas, ahora bien, cada vez es más frecuente la necesidad de conocer el estado de la función visual con relación a la resolución espacial en condiciones mesópicas. Múltiples trabajos valoran la agudeza visual mesópica buscando un

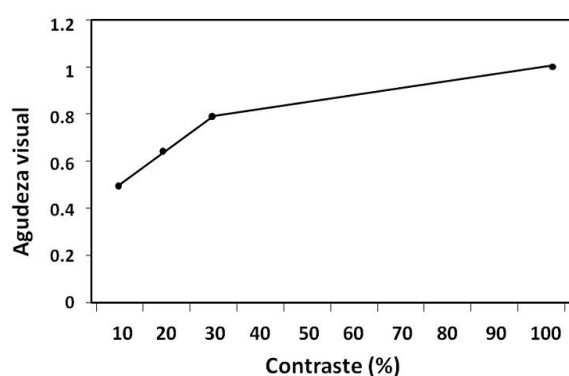


indicador válido de las variaciones de la resolución espacial mediante test con diferentes niveles de contraste con objeto de emular las distintas condiciones de iluminación propias de diferentes situaciones ambientales posibles durante tareas tan comprometidas como la conducción nocturna (25, 54).

En el trabajo de esta Tesis Doctoral se valora de manera expresa la agudeza visual mesópica por ser la idónea para evaluar la capacidad de percepción de detalles en conducción nocturna.

Algunas de las causas que producen el déficit de agudeza visual mesópica son bien conocidas. Entre ellas las más destacadas son la dilatación pupilar, las aberraciones ópticas del ojo, la aparición de miopía nocturna, y otras condiciones que se valorarán en los apartados correspondientes de este documento.

En lo referente al contraste, si se analizan algunos aspectos de los optotipos de agudeza visual entre el estímulo y el fondo, inicialmente la agudeza visual aumenta rápidamente con el contraste. A partir de un determinado valor de contraste (aproximadamente un 40%), el aumento en la agudeza visual es menor, alcanzándose un límite asintótico a medida que el contraste se va acercando a la unidad, cuando se hace máximo (52, 53, 55, 56).



**Figura 23. Variación de la agudeza visual en función del contraste. Tomado de Cuiña, 2003.**

La mayoría de los tests empleados para valorar la agudeza visual utilizan optotipos de alto contraste (100%); es decir, caracteres negros sobre fondo blanco. En general el contraste es superior al 75 %, presentando una distribución

## INTRODUCCIÓN

lumínica homogénea y con variaciones máximas de contraste entorno al 10 %. Los optotipos impresos muestran un contraste con ratios de 3:100 o 5:100, sin embargo, en los sistemas de proyección los niveles de contraste se encuentran entre 10:100 y 20:100 (57).

Para esta Tesis Doctoral es imprescindible incluir el concepto de test de agudeza visual de diferentes contrastes, lo que se denomina optotipos de bajo contraste. Este tipo de optotipos está diseñado para diferentes contrastes entre la figura y el fondo del optotipo. Ahora bien, estos pueden mostrarse en los tres formatos habituales de valoración: paneles, sin y con retroiluminación, proyectores, y sistemas de pantallas.

Los test de agudeza visual de bajo contraste, usualmente utilizan letras “gris claro” sobre fondo blanco, se usan habitualmente como un método para reconocer los cambios que afectan a la sensibilidad de contraste (38). La medida en la que la agudeza se degrada por la disminución de contraste puede determinar pacientes cuya sensibilidad al contraste haya sido alterada por un trastorno visual. Entre los test disponibles más utilizados se encuentran los test de Regan (58) , con varios niveles de contraste o los conocidos test de Bailey-Lovie (59). Haegerstrom-Ponnoy diseñó unos tests de bajo contraste mediante la impresión de letras negras en formato Bailey-Lovie sobre un fondo gris oscuro, se les conoce como los tests del Instituto Smith-Kettlewell (test SKILL), son elementos muy útiles ya que se demostró que eran más sensibles para detectar cambios en la función visual después de sufrir enfermedades de retina y de nervio óptico que otras pruebas de agudeza visual y de sensibilidad al contraste (60).

La agudeza de bajo contraste es valiosa para explicar diversas implicaciones clínicas como la función visual de portadores de lentes de contacto blandas (61, 62), de lentes de contacto multifocales (63), y hasta en pacientes con cataratas (64, 65), especialmente con presencia de deslumbramiento. Además, tras la cirugía LASIK la agudeza de bajo contraste se ve alterada y se ha determinado la influencia negativa de la edad en la capacidad de resolver test de contraste disminuido (66).

Por todo lo anteriormente expuesto, la medida de la agudeza visual en clínica suele determinarse con optotipos de máximo contraste entre el estímulo y el fondo y con una luminancia ambiental que tiene relativamente poco efecto sobre ésta - aproximadamente  $100 \text{ cd/m}^2$ . No obstante, muchos autores son partidarios de utilizar optotipos de alto y bajo contraste para valorar ciertas enfermedades oculares o neurológicas (58, 67-71).

### **1.3.3.2 Sensibilidad al contraste**

La medida de la agudeza visual de alto contraste se ha comprobado que permite determinar cuál es el detalle más pequeño que un sujeto puede ver en una condición de máximo contraste, es decir, un estímulo negro sobre un fondo blanco. Pero en el mundo real, al igual que existe un gradiente continuo de tamaños, definibles como frecuencias espaciales, existe también un gradiente continuo de contrastes, entre el fondo y el estímulo (72, 73).

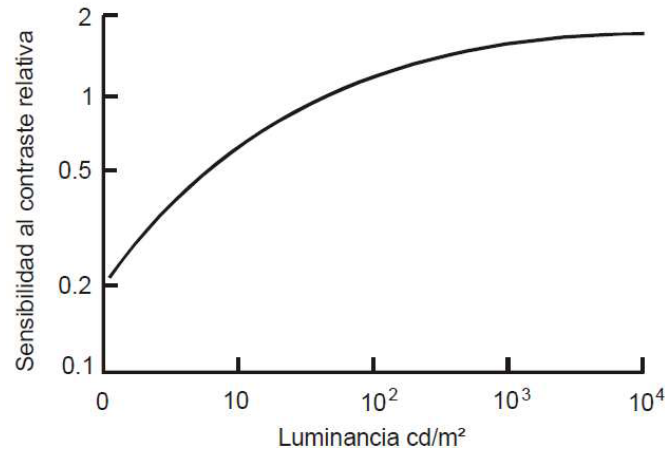
La sensibilidad al contraste (SC) se puede definir como la capacidad del sistema visual para detectar pequeñas diferencias entre intensidades de gris (74).

El umbral de contraste se define como el mínimo contraste necesario para distinguir un estímulo y la SC es la inversa del umbral de contraste. Podría decirse, por tanto, que la SC es la capacidad de detectar diferencias de luminosidad entre zonas contiguas (75) y determina el mínimo contraste necesario para permitir la detección de un objeto. Consecuentemente un sujeto que requiera mucho contraste para poder diferenciar un objeto presentará un valor de SC muy bajo y a la inversa.

El sistema visual reacciona correctamente ante las variaciones espaciales de luminancia. Por ello, la determinación del contraste umbral requerido para ver un estímulo cuya luminancia varía espacialmente, supone una forma idónea para determinar la capacidad del sistema visual para hallar modificaciones en la luminancia.

## INTRODUCCIÓN

En la siguiente figura, se representa gráficamente la sensibilidad al contraste en función del nivel de luminancia. Al igual que la agudeza visual, la sensibilidad al contraste mejora con niveles de luminancia crecientes, hasta alcanzar un valor asintótico (2, 76).



**Figura 24. Función de referencia de la CIE, 1981. Sensibilidad al contraste relativa (RCS). Tomado de Artigas, 1995.**

Bajo condiciones de iluminación mesópica o con deslumbramiento donde el contraste se ve disminuido, la eficacia del sistema visual se valora de mejor manera con la sensibilidad al contraste que con la agudeza visual (76). Adicionalmente, con esta prueba se pueden detectar disfunciones visuales muy precoces, incluso cuando la agudeza visual es normal (71).

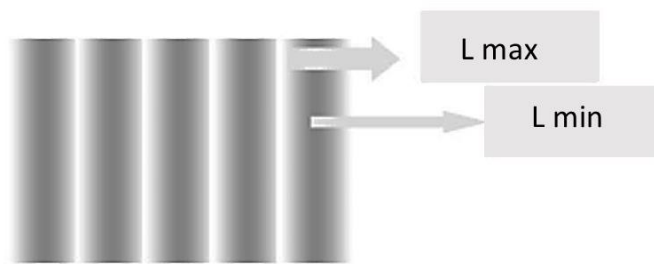
Mientras que para medir el contraste de optotipos de letras de contraste decreciente se suele utilizar el contraste de Weber ( $\text{Weber} = (L_f - L_o) / L_f$ ; siendo  $L_f$  y  $L_o$  las luminancias del fondo y del objeto, respectivamente) cuando las fracciones de áreas de distinto contraste son de un tamaño similar, la forma más habitual de definir el contraste (C) es a través del uso de redes sinusoidales de diferente frecuencia espacial, utilizando la ecuación de Michelson (39):

$$C = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$$

**Fórmula 2.** Ecuación de contraste de Michelson, donde  $L_{max}$ = luminancia máxima y  $L_{min}$ = luminancia mínima de las redes sinusoidales

El contraste de Michelson varía entre 0 (ausencia de contraste) hasta 1 (máximo contraste entre el estímulo y el fondo), o entre un 0% y un 100%. El contraste de Michelson es, por tanto, una unidad menos cuantificable variando entre 0 y 1 ó 0% y 100%.

La sensibilidad al contraste se suele examinar con tests formados por redes sinusoidales:



**Figura 25.** Modelo de red sinusoidal. Tomado de Pérez-Carrasco, 2006.

La distancia espacial entre dos bandas sucesivas es determinante para establecer la frecuencia espacial. La red sinusoidal está formada por un número repetido de franjas oscuras y claras alternadas, cuya luminancia sigue una distribución de onda sinusoidal perpendicular a la dirección de las franjas. Cada pareja constituida por una franja oscura y una clara forma un ciclo. La frecuencia espacial es el número de ciclos completos de alternancias luminosas por grado de ángulo visual; se mide, por tanto, en ciclos/grado (cpg) (77).

Se dice que hay una alta frecuencia espacial cuando para un grado hay un número elevado de bandas y por tanto la red (test) es delgada. En el caso de

## INTRODUCCIÓN

que la red se engrose, en un grado se presentan una menor cantidad de bandas y consecuentemente su frecuencia espacial es baja (78).

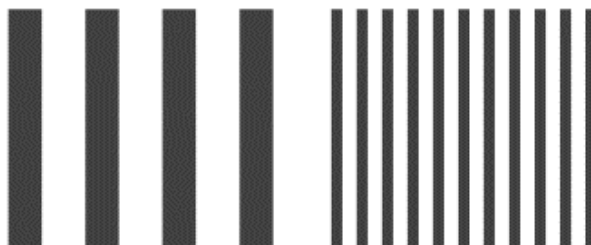


Figura 26. Red de perfil cuadrado de frecuencia espacial baja y alta. Tomado de [www.contrastsensitivity.net](http://www.contrastsensitivity.net)

Las frecuencias espaciales bajas, inferiores a 0.5 cpg, se asocian con la detección de objetos grandes; las medias (2 a 6 cpg) con el reconocimiento de objetos de mediano tamaño; y las altas (superiores a 10 cpg) con la percepción de detalles finos. En términos de agudeza visual, una letra que corresponde a una agudeza visual logMAR de 1,0 (0,1 en escala decimal) corresponde a aproximadamente a 3 cpg, mientras que la letra de agudeza visual logMAR 0,00 (1,0 en la escala decimal) a unos 30 cpg (79).

En 1968, Campbell y Robson definieron la función de sensibilidad al contraste (FSC) para ondas sinusoidales como la interpretación de la inversa del contraste umbral de distribuciones sinusoidales (eje de ordenadas) frente a la frecuencia espacial de la senoide (eje de abscisas), en ciclos subtendidos en un grado de ángulo visual (73, 77, 80).

Para valorar la FSC se va disminuyendo el contraste de una red sinusoidal, permaneciendo constante su luminancia media hasta conseguir su umbral. La sensibilidad al contraste es precisamente la inversa de este nivel de contraste. La medida de la FSC se alcanza repitiendo este proceso para las diferentes frecuencias espaciales (78). La curva que se obtiene alcanza un máximo de sensibilidad para niveles de iluminación fotópicos de entre 4 y 6 cpg según unos autores (80) o, según otros (81, 82), de entre 2 y 4 cpg. A partir de

estos valores, la sensibilidad al contraste disminuye según aumenta la frecuencia espacial, hasta llegar a una frecuencia límite o de corte, que indica la máxima frecuencia detectable para la que se precisa un contraste máximo. Esta frecuencia de corte, que se sitúa entre 30 y 60 cpg, estima de forma bastante aproximada la agudeza visual (67).

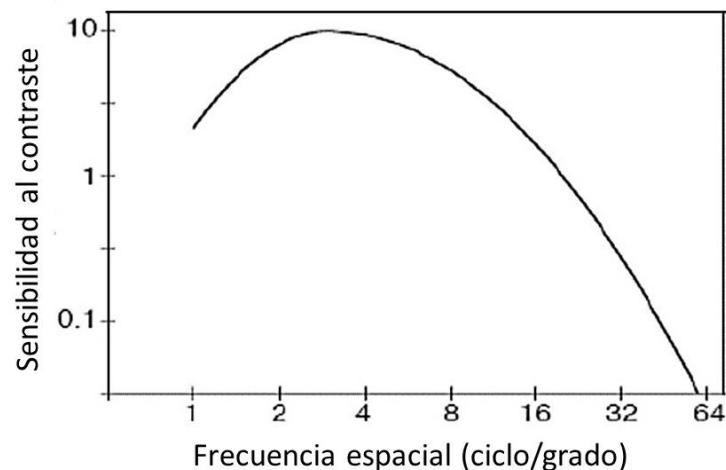
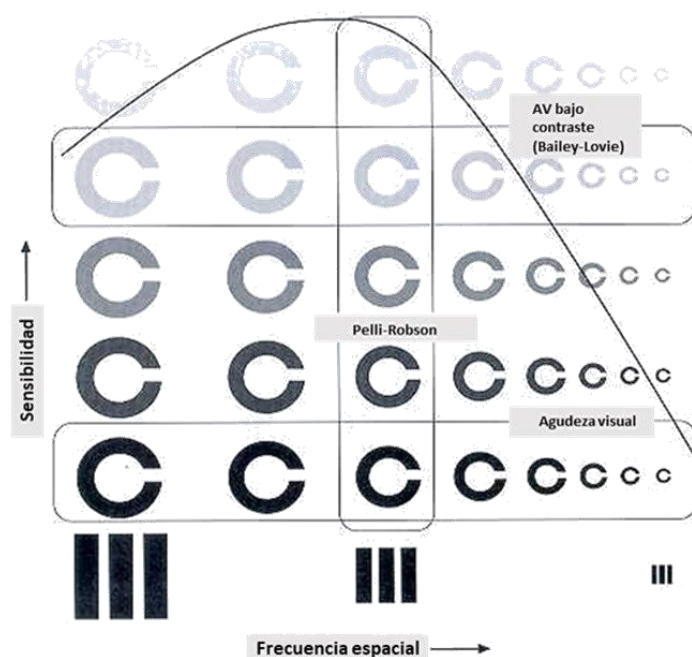


Figura 27. Función de Sensibilidad al contraste (FSC). Tomado de Kalpana, 2009.

El área por encima de la curva corresponde a una zona de bajo contraste, donde el ojo no puede identificar un objeto y, el área bajo la curva, corresponde a los distintos niveles de contraste según la frecuencia espacial, donde el ojo es capaz de discriminar el objeto.

En el sistema visual humano la sensibilidad al contraste disminuye de forma progresiva hacia las frecuencias más altas, ya que fenómenos como la difracción y las aberraciones ópticas desenfocan los detalles finos de la imagen. El ojo puede detectar los objetos gracias a la diferencia existente entre la luminancia del objeto y del fondo. La detección queda definida en términos de la luminancia máxima y la mínima en el borde del objeto. La máxima sensibilidad al contraste del sistema visual humano se presenta para las frecuencias intermedias entre 5 y 10 grados por ángulo visual (83).



**Figura 28. Correlación entre un test de agudeza visual de bajo, medio y alto contraste, de optotipos de contraste variable, de optotipos de alto contraste y la función de sensibilidad al contraste. Cortesía de Pérez-Carrasco.**

Las primeras medidas para analizar la sensibilidad al contraste fueron en 1845 realizadas por Masson, empleando diferentes discos rotatorios. Posteriormente, Bjerrum, en 1884, elaboró un test de letras con contraste del 9%, 20%, 30% y 40% (74). Desde entonces se han desarrollado diferentes test para obtener valores más reales de la percepción del contraste. Las investigaciones continúan de tal forma que a finales de los años setenta y comienzos de los ochenta, se diseñaron las primeras pruebas clínicas de sensibilidad al contraste para valorar de manera global la función visual (74), permitiendo evaluar diferentes frecuencias espaciales así como detectar patologías y alteraciones que afectan a la visión (84).

A continuación, se exponen los principales test de medida de la sensibilidad al contraste utilizados hoy en día.



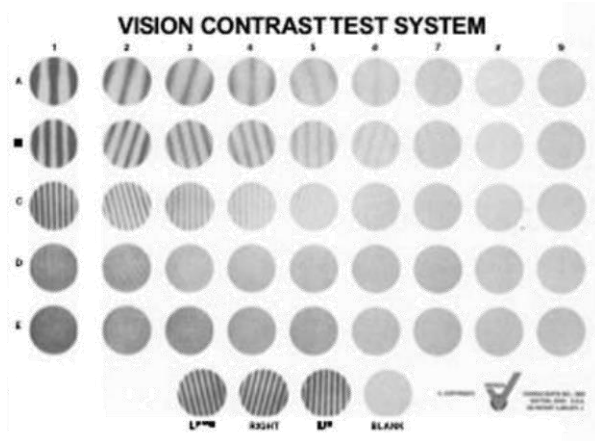


Figura 29. Test Vistech de sensibilidad al contraste.  
Tomada de Ginsburg, 1984.

El test de VCTS (Vistech Consultants, INC, 1984, Stereo Optical Company) renombrado del Sine Wave Contrast fue introducido por primera vez en 1984 por Ginsburg (74). Es un panel que contiene, con una disposición de tabla, la reproducción de láminas circulares de perfil sinusoidal distribuidas en cinco filas y nueve columnas.

El sujeto debe señalar para cada rango de frecuencia espacial la disposición de la rejilla en cada nivel de contraste. La curva de la FSC se realiza a partir de las cinco frecuencias utilizadas. Las filas presentan cinco frecuencias espaciales (1,5; 3; 6; 12 y 18 ciclos/grado) correspondientes al estándar aceptado de canales de frecuencias para la visión humana. Cada nivel contiguo de contraste presenta, respecto del que le precede, una disminución de 0,25 unidades logarítmicas de media. La valoración se realiza a 3 metros para visión lejana y a 40 centímetros para visión próxima.

El **Functional Acuity Contrast Test FACT** se considera una continuación del Test VCTS, también desarrollado por Ginsburg (74). La carta presenta cinco frecuencias espaciales y nueve niveles del contraste.



Figura 30. Test Functional Acuity Contrast.  
Tomada de Ginsburg, 1984.

## INTRODUCCIÓN

El test FACT presenta el mismo modo de proceder del VCTS, tanto para la forma de realización de la prueba como su representación (mismas distancias).

Se debe indicar que el FACT mejora la fiabilidad de la prueba respecto al Vistech original proporcionando resultados más reproducibles.

**Test CSV-1000:** siendo uno de los test más empleados para evaluar la SC actualmente, es el que se ha utilizado en esta Tesis Doctoral. Presenta cuatro frecuencias espaciales de 3, 6, 12 y 18 ciclos/grado, con 9 niveles de contraste. Para cada frecuencia espacial hay dos filas, una encima de la otra, de las cuales una contiene las láminas con la rejilla sinusoidal mientras que la otra presenta un patrón gris uniforme.



Figura 31. Panel CSV-1000 con test. Tomada de [www.good-lite.com](http://www.good-lite.com)

El paso de cada nivel de contraste al siguiente es de 0,14 unidades logarítmicas. El sujeto debe distinguir cuál es la primera lámina que muestra la rejilla sinusoidal en cada nivel de contraste. Consecuentemente, se trata de un test con un par de respuestas alternativas (75). La prueba cuenta con su propio sistema de iluminación que proporciona una luminancia de 85 candelas/m<sup>2</sup>.

La prueba concluye cuando el sujeto no es capaz de determinar la presencia de la rejilla, es decir, no percibe contraste. Pomerance y Evans en 1994 mostraron en personas adultas que este test tiene una reproducibilidad alta lo cual indica que es fiable para evaluar la visión de conductores mayores (85, 86).

**Test de Pelli-Robson:** es un panel de dimensiones 86 x 63 cm que contiene 16 tríos de optotipos de 4,9 x 4,9 cm, con frecuencia espacial de 1 ciclo/grado. Todo trío de optotipos mantiene el mismo contraste, el cual decrece en un factor de 0,15 unidades logarítmicas. El test tiene que ser iluminado exteriormente en consecuencia es preciso valorar de forma exhaustiva el nivel de iluminación y controlar la ausencia de brillos y deslumbramientos (74).



**Figura 32. Test de sensibilidad al contraste Pelli-Robson. Tomado de Williamson, 1992.**

La curva de SC obtenida con tests de redes sinusoidales posee una sensibilidad mayor y aporta más información que los paneles de optotipos de letras de contraste decreciente. En la siguiente figura se exponen los valores medios de sensibilidad al contraste obtenidos con tests de redes sinusoidales (VCTS, SWCT, FACT), con los de Pelli-Robson y con los de Regan, así como la curva de contraste umbral obtenida con optotipos tipo Snellen. El contraste umbral muestra el límite superior de sensibilidad que se puede obtener con letras de bajo contraste. Como se puede observar, cada test de determinación del contraste mide un rango diferente de frecuencias espaciales y de niveles de contraste. La sensibilidad de los optotipos de letras no llega a alcanzar la sensibilidad de las redes sinusoidales (87).

## INTRODUCCIÓN

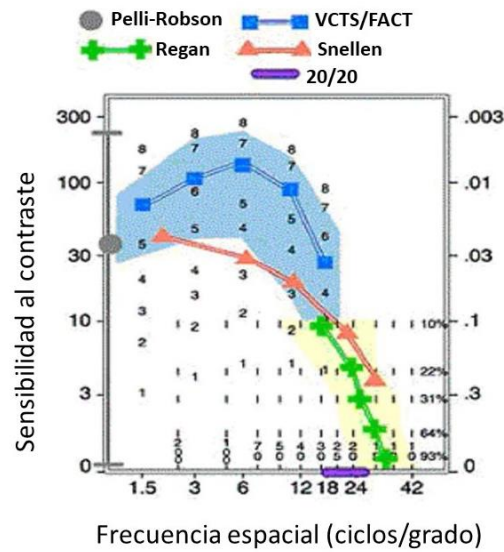


Figura 33. Curvas de sensibilidad al contraste obtenidas con distintos tests. Tomado de Vision Sciences, 2002.

Por último, cabe resaltar que la diferencia en los resultados de FSC obtenidos en visión de lejos y de cerca no tienen por qué diferir de forma estadísticamente significativa (88). Sin embargo, la FSC varía con el nivel de iluminación (22) y con la edad; mientras que, como se ilustra en la siguiente figura, las frecuencias espaciales bajas se mantienen relativamente constantes, las altas van disminuyendo por décadas de edad (82).

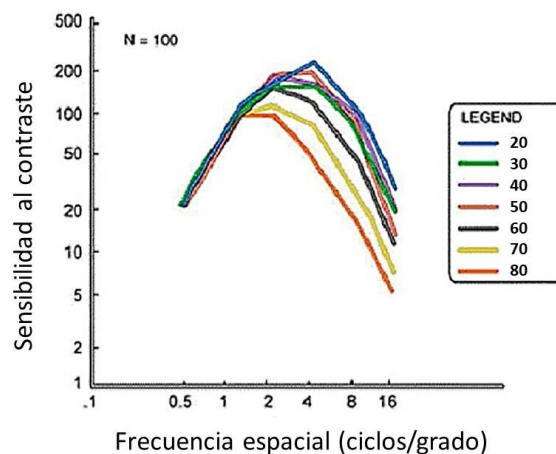


Figura 34. Curvas de sensibilidad al contraste en función de la edad. Tomado de Owsley et al., 1983.

### 1.3.4 Visión y edad

Al alcanzar la senectud, el sistema visual tiene un número elevado de alteraciones en la transmisión óptica y en los mecanismos de percepción (89). No obstante, hay otras funciones que permanecen prácticamente sin cambios como pueden ser la agudeza Vernier y las constancias en la percepción del color (90).

Los cambios producidos en el sistema visual, que se pueden observar con mayor facilidad son los cambios anatómicos, afectando a su funcionalidad. Uno de los más recurrentes son las cataratas; se manifiestan mediante una opacidad en el cristalino y suponen en muchos casos una situación de discapacidad, dispersando la luz e impidiendo la incidencia de la misma sobre la retina. Esta disminución en la capacidad visual dificulta, de manera importante, las actividades de la vida diaria (91-93).

Otro importante cambio anatómico se produce en la retina, donde hay una reducción en el número de bastones en la región paracentral. En efecto, la media de pérdida de bastones diaria es de dos por milímetro cuadrado. Uno de los mayores avances en el conocimiento de estos cambios ha sido comprobar que en personas sanas la densidad espacial de los bastones disminuye alrededor de un 30% en los 28,5 grados de visión central en el período que abarca desde los 34 hasta los 90 años. Esta pérdida de bastones se produce de forma considerable entre los 45 y los 61 años en la parte inferior de la fovea y a partir de los 90 se observa una pérdida mayor en el anillo parafoveal, con una excentricidad que varía entre 0,5 y 3 mm (94).

Además, hay otro tipo de alteraciones a nivel óptico que influyen en la función visual, aunque suelen ser de menor consideración que las citadas anteriormente. Un ejemplo serían las aberraciones de tipo coma, que distintos estudios relacionan con la edad, o las aberraciones esféricas, que no varían significativamente con el paso del tiempo (95). Otras manifestaciones que afectan a la transmisión de la luz en la visión son la mayor sensibilidad al deslumbramiento y el aumento de la dispersión de la luz (96, 97).

## INTRODUCCIÓN

Además de los cambios anatómicos y ópticos, existen modificaciones en el procesamiento sensorial; como puede ser la reducida sensibilidad a la luminancia, con especial incidencia en la visión estereoscópica (98, 99). La sensibilidad a bajas frecuencias espaciales permanece estable con el paso del tiempo, pero la sensibilidad a medias y altas frecuencias se ve afectada y disminuye con la edad (100).

En relación al procesamiento de la percepción, se pueden producir descensos en la integración espacial (101, 102). Varios estudios aseguran que las personas de mayor edad tienen menor capacidad de procesamiento de la información óptica (103). Este hecho sugiere que este sector de la población tiene mayor dificultad para recuperar la información crítica cuando se encuentran en movimiento (89); afectando de manera directa a su vida cotidiana. Además, estos cambios se ven reflejados en las estadísticas de accidentes de tráfico para los conductores en este rango de edad (96, 104-107).

Por otro lado, diversos estudios demuestran que los cambios en la capacidad visual no se deben a cambios sensoriales o cerebrales; puesto que aunque aparecen reducciones de volumen en la materia blanca en el lóbulo prefrontal así como en el hipocampo, no se observan cambios significativos en el córtex visual (108). Afortunadamente el sistema visual humano tiene una gran plasticidad y esto permite, con un entrenamiento conveniente, mejorar la función perceptual (89).

En resumen, la disminución de las capacidades visuales en las personas de mayor edad influye negativamente en su vida cotidiana, afectando a diversas tareas que dependen de la visión, como puede ser la conducción de vehículos.

## **1.4 Conducción de vehículos**

El vehículo es un elemento indispensable en el día a día. Del mismo modo, una buena visión es fundamental para enfrentarse con seguridad al volante. Teniendo en cuenta que el 90% de la información que se recibe es a través de nuestros ojos, la visión debe ser uno de los puntos prioritarios de una política estatal en materia de seguridad vial.

Los avances de los diferentes países en la mejora del entorno (carreteras y señalizaciones) y de los fabricantes, con vehículos cada vez más seguros, mejoran la seguridad, contribuyendo al descenso de la siniestralidad. El conductor, mediante la toma de decisiones, es el principal agente en la tarea de conducción y la seguridad en el proceso depende básicamente de él. El imparable aumento en el número de conductores, el incremento del transporte por carretera y, consecuentemente, del uso de vehículos para todo tipo de actividades, ha traído parejo un incremento de la tasa de siniestralidad en carretera.

En esta Tesis Doctoral, por la influencia que el estado de la función visual imprime a la correcta conducción de vehículos y en consecuencia al riesgo de siniestralidad se mostrará a continuación datos estadísticos al respecto.

## INTRODUCCIÓN

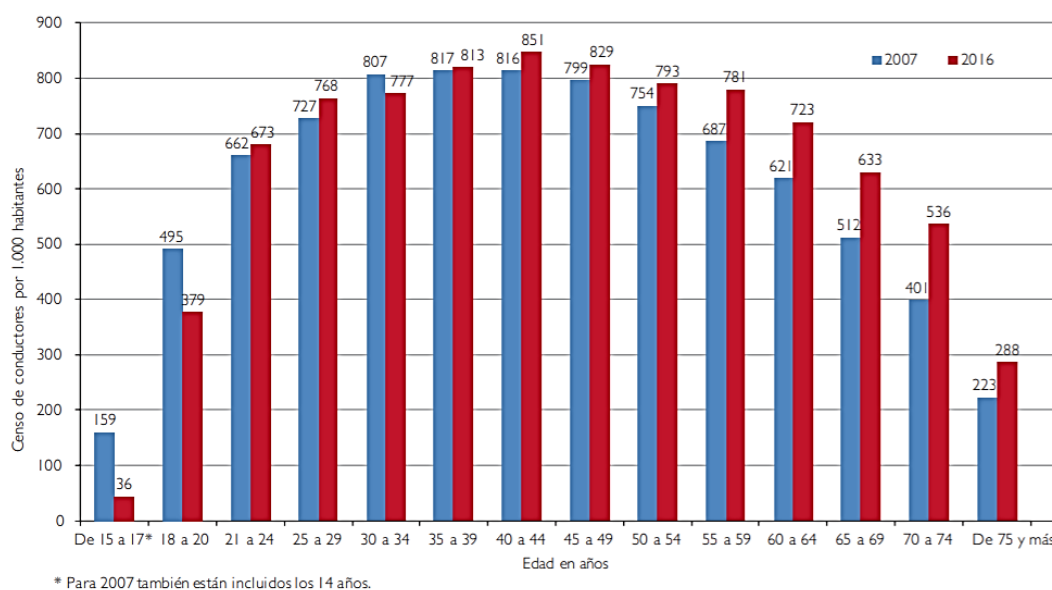
En 2016 la Dirección General de Tráfico (DGT) censó un total de 26.514.026 conductores, lo que constituye un incremento con respecto a 2015 del 1%.

**Tabla 3. Censo de conductores con licencia. Tomado de Dirección General de Tráfico, 2016**

<b>AÑOS</b>	<b>Hombres</b>	<b>Mujeres</b>	<b>TOTAL</b>
1990	11.520.124	4806.320	16.326.444
1991	11.823.659	5.120.803	16.944.462
1992	12.096.253	5.436.837	17.533.090
1993	12.296.224	5.693.225	17.989.449
1994	12.503.082	5.951.573	18.454.655
1995	12.711.985	6.205.392	18.917.377
1996	12.948.702	6.471.546	19.420.248
1997	13.150.928	6.757.503	19.908.431
1998	13.429.851	7.057.010	20.486.861
1999	13.622.620	7.329.699	20.952.319
2000	13.804.611	7.612.495	21.417.106
2001	13.696.414	7.852.025	21.548.439
2002	13.849.261	8.118.246	21.967.507
2003	13.986.087	8.395.498	22.381.585
2004	14.318.263	8.701.157	23.019.420
2005	14.589.515	9.032.391	23.621.906
2006	14.774.983	9.368.500	24.143.483
2007	15.007.265	9.705.015	24.712.280
2008	15.410.523	10.084.845	25.495.368
2009	15.464.023	10.268.364	25.732.387
2010	15.428.228	10.370.777	25.799.005
2011	15.545.721	10.587.789	26.133.510
2012	15.606.700	10.717.271	26.323.971
2013	15.616.630	10.785.030	26.401.660
2014	15.347.999	10.869.203	26.217.202
2015	15.362.190	10.987.846	26.350.036
2016	15.377.544	11.136.482	26.514.026



La tasa de conductores censados por mil habitantes con la mínima edad permitida para conducir fue 673. Entre los 35 y los 49 años, la tasa supera los 800 conductores por 1.000 habitantes; para los grupos de edad de 21 a 34 años y de 50 a 64 años, la tasa se aproxima o supera los 700 conductores por 1.000 habitantes; y, en el grupo de 65 a 69 años, la tasa supera el valor de 600 por cada mil habitantes.



**Figura 35. Censo de conductores por 1000 habitantes cuya edad habilita a conducir. Informe 2007-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017.**

## INTRODUCCIÓN

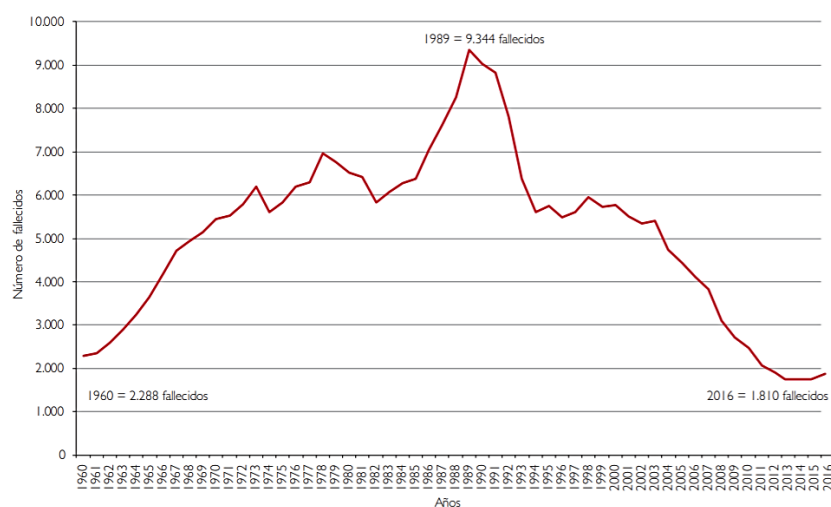
Por otro lado, teniendo en cuenta todas las clases de vehículos, el número de vehículos que transitan en carreteras españolas ha aumentado en más de un millón en los últimos 10 años. El mayor incremento se produce para los vehículos particulares, con una subida del 2%.

**Tabla 4. Evolución del parque de automóviles. Informe 2007-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017.**

Parque	2007	2010	2013	2016	Diferencia 2016/2015	Variación interanual 2007-2016
Camiones y furgonetas	5.140.586	5.103.980	4.887.352	4.879.480	1%	-1%
Autobuses	61.039	62.445	59.892	61.838	3%	0%
Turismos	21.760.174	22.147.455	22.024.538	22.876.830	2%	1%
Motocicletas	2.311.346	2.707.482	2.891.204	3.211.474	4%	4%
Ciclomotores	2.430.414	2.290.207	2.107.116	1.987.470	-2%	-2%
Tractores industriales	212.697	199.486	182.822	207.889	6%	0%
Otros vehículos <sup>1</sup>	427.756	450.514	463.181	425.411	1%	0%
<b>Total</b>	<b>32.344.012</b>	<b>32.961.569</b>	<b>32.616.105</b>	<b>33.650.392</b>	<b>2%</b>	<b>0%</b>

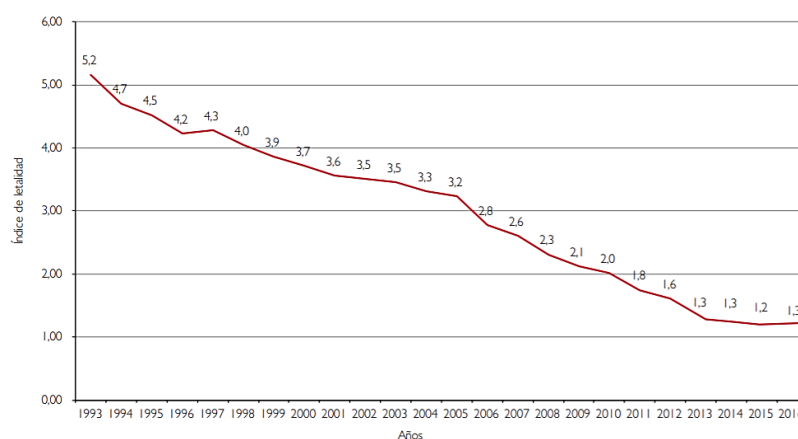
<sup>1</sup> La categoría de otros vehículos incluye los vehículos especiales como son las barredoras, quitanieves, grúas, maquinaria de obras, etc. Se han excluido los remolques y semirremolques.

Desde el año 1960, la curva de los datos de fallecidos a causa de un accidente de tráfico ha ido aumentando con el tiempo, alcanzando su pico en el año 1989 con 9.344 fallecidos. A partir de entonces, la tendencia ha disminuido, consiguiendo un mínimo histórico en el año 2013 con 1.680 fallecidos. Sin embargo, en el 2016 ha habido un aumento con respecto al año anterior del 7% con un número de víctimas mortales de 1.810.



**Figura 36. Proyección de los decesos en accidentes de tráfico en España. 1960-2016 Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017.**

La letalidad, establecida como el número de fallecidos entre el número de víctimas, ha descendido desde 1993, como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 37. Evolución de la letalidad (n.º de fallecidos / n.º de víctimas x 100) en los accidentes de tráfico con víctimas. España 1993-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017.**

## INTRODUCCIÓN

Respecto a la relación entre los distintos tramos horarios y la siniestralidad vial, el informe indica que el 64% de las víctimas mortales en accidente de tráfico se produjeron durante la franja horaria de las 8:00 a las 19:59 horas. En el año 2016, el número de fallecidos en accidentes aumentó un 6% (de 8:00 a 19:59), y un 9% (de 20:00 a 07:59) con respecto al año anterior.

**Tabla 5. Fallecidos según tramos horarios. Informe 2007-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017.**

Tramos horarios	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Variación 2016/2015	Variación Interanual 2007-2016
De 8:00 a 19:59 horas	2.229	1.911	1.663	1.509	1.253	1.203	1.101	1.056	1.093	1.158	6%	-7%
De 20:00 a 7:59 horas	1.594	1.189	1.051	969	807	700	579	632	596	652	9%	-9%
<b>Total</b>	<b>3.823</b>	<b>3.100</b>	<b>2.714</b>	<b>2.478</b>	<b>2.060</b>	<b>1.903</b>	<b>1.680</b>	<b>1.688</b>	<b>1.689</b>	<b>1.810</b>	<b>7%</b>	<b>-8%</b>

El tramo horario comprendido entre las 8:00 y las 19:59 presenta un mayor número de fallecidos, sin embargo, es el período de la noche (entre las 20:00 y las 7:59) el que revela un índice de letalidad más elevado, tanto en vías interurbanas como en vías urbanas.

**Tabla 6. Fallecidos, heridos y letalidad según tramos horarios. Informe 2007-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017.**

Vías interurbanas y urbanas	Intervalo 8:00-19:59h	Intervalo 20:00-7:59h	Total
Fallecidos	1.158	652	1.810
Porcentaje	64%	36%	100%
Heridos	101.662	38.728	140.390
Porcentaje	72%	28%	100%
Índice de letalidad	1,1	1,7	1,3
Vías interurbanas	Intervalo 8:00-19:59h	Intervalo 20:00-7:59h	Total
Fallecidos	821	470	1.291
Porcentaje	64%	36%	100%
Heridos	40.635	15.794	56.429
Porcentaje	72%	28%	100%
Índice de letalidad	2,0	2,9	2,2
Vías urbanas	Intervalo 8:00-19:59h	Intervalo 20:00-7:59h	Total
Fallecidos	337	182	519
Porcentaje	65%	35%	100%
Heridos	61.027	22.934	83.961
Porcentaje	73%	27%	100%
Índice de letalidad	0,5	0,8	0,6

Además, en 2016, el 70% de los accidentes con víctimas, en vías interurbanas ocurrieron durante el día. En las vías urbanas también es durante el día cuando se registra la mayor concentración de accidentes y víctimas.

Como se puede observar en la tabla siguiente en las zonas interurbanas el número de fallecidos en las noches sin iluminación natural (347 víctimas) es mucho mayor que en las noches con iluminación (72 víctimas). Esto no es así en las zonas urbanas, el motivo puede ser debido a que las zonas urbanas están más iluminadas que las zonas interurbanas, pese a que sea una noche sin iluminación natural.

**Tabla 7. Accidentes con víctimas, fallecidos, heridos hospitalizados y heridos no hospitalizados según luminosidad. Vías interurbanas y urbanas. Informe 2007-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017.**

Luminosidad	Vías interurbanas							
	Accidentes con víctimas		Fallecidos		Heridos hospitalizados		Heridos no hospitalizados	
	Número	Dist. %	Número	Dist. %	Número	Dist. %	Número	Dist. %
Día	25.832	70%	802	62%	3.499	69%	35.726	70%
Crepúsculo	2.007	5%	70	5%	265	5%	2.789	5%
Noche con iluminación	2.652	7%	72	6%	289	6%	3.859	8%
Noche sin iluminación	6.230	17%	347	27%	997	20%	9.005	18%
Luminosidad	Vías urbanas							
	Accidentes con víctimas		Fallecidos		Heridos hospitalizados		Heridos no hospitalizados	
	Número	Dist. %	Número	Dist. %	Número	Dist. %	Número	Dist. %
Día	47.507	72%	312	60%	3.165	67%	56.825	72%
Crepúsculo	3.893	6%	45	9%	347	7%	4.603	6%
Noche con iluminación	13.058	20%	123	24%	1.027	22%	16.374	21%
Noche sin iluminación	1.183	2%	39	8%	166	4%	1.454	2%

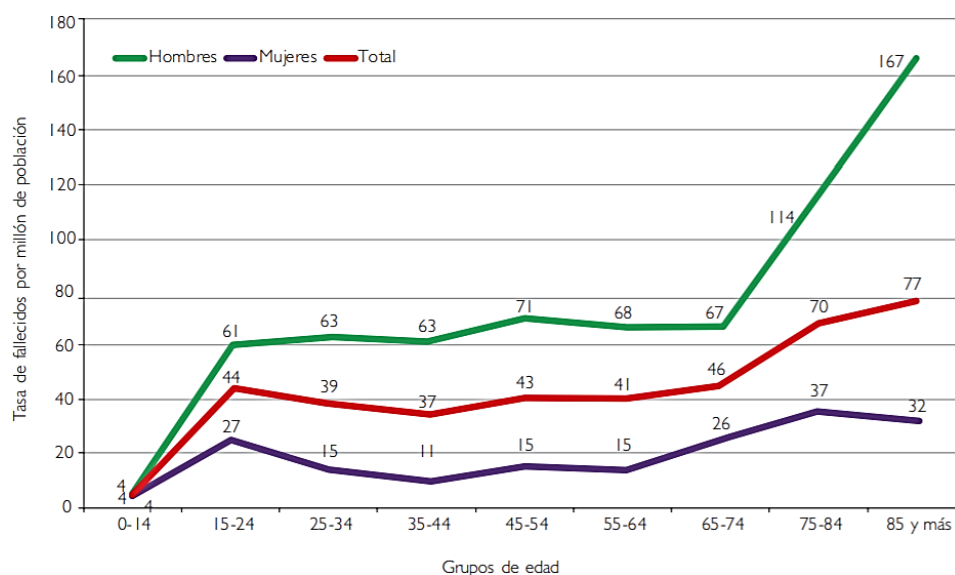
En el año 2016, el rango de edad que más se vio afectado por los accidentes de tráfico fue el comprendido entre los 45 y los 54 años, presentando una cifra de 311 fallecidos. Teniendo en cuenta la proporción de fallecidos por millón de población, los grupos de mayor edad se ven más afectados: 46 fallecidos entre los 65-74 años, 70 fallecidos entre los 75-84 años y 77 fallecidos de 85 y más años.

## INTRODUCCIÓN

**Tabla 8. Fallecidos por grupos de edad. Informe 2007-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017.**

Grupos de edad	Total							
	Fallecidos		Heridos hospitalizados		Heridos no hospitalizados		I. Letalidad	Total fallecidos por millón de población
	Número	Dist. %	Número	Dist. %	Número	Dist. %		
0-14	28	2%	385	4%	6.925	5%	0,4	4
15-24	198	11%	1.415	15%	23.010	18%	0,8	44
25-34	223	12%	1.622	17%	28.526	22%	0,7	39
35-44	289	16%	1.798	18%	26.790	21%	1,0	37
45-54	311	17%	1.692	17%	19.651	15%	1,4	43
55-64	230	13%	1.161	12%	11.466	9%	1,8	41
65-74	198	11%	785	8%	6.413	5%	2,7	46
75-84	210	12%	609	6%	3.692	3%	4,7	70
85 y más	105	6%	172	2%	933	1%	8,7	77
Sin especificar	18	1%	116	1%	3.229	2%	0,5	
<b>Total</b>	<b>1.810</b>	<b>100%</b>	<b>9.755</b>	<b>100%</b>	<b>130.635</b>	<b>100%</b>	<b>1,3</b>	<b>39</b>
Media edad	51		44		38			

Para concluir este apartado sobre los fallecimientos a causa del tráfico, se puede ver que los hombres sufrieron más muertes (1.395, 77%) que las mujeres (410, 23%).



**Figura 38. Tasa de fallecidos según edad y sexo por millón de habitantes. Informe 2007-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017.**

### 1.4.1 Reglamento de conducción en España

El 8 de mayo del 2009, es aprobado por el Real Decreto el Reglamento General de conductores en España, donde se incorpora la Directiva 2006/126/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre sobre el Permiso de Conducción.

A continuación, se destacan los puntos del reglamento necesarios para un mejor entendimiento del presente trabajo.

#### 1.4.1.1 Clases de permisos

Tal y como establece el artículo 4 del reglamento, las clases de permiso de conducción son las siguientes:

- Clase AM, A1, A2 y A: autorizan para conducir ciclomotores, motocicletas y triciclos de motor.

- Clase B, B+E: autorizan la conducción de triciclos y cuatriciclos de motor, de automóviles (masa máxima 3.500 kg) para el transporte de no más de ocho pasajeros a parte del conductor. Estos automóviles tendrán derecho a llevar un remolque (masa máxima 750kg). Además, incluyen los conjuntos de vehículos acoplados (vehículo tractor y un remolque).

- Clase BTP: autoriza la conducción de vehículos prioritarios (servicio urgente, transporte escolar y transporte público). Con una masa máxima 3.500 kg y con validez solo dentro del territorio nacional.

- Clases C, C+E, C1, C1+E, D, D1, D+E, E: autorizan para conducir camiones, camiones con remolque y autobuses de, variando según el número de pasajeros, remolque y masa máxima autorizada.

#### 1.4.1.2 Grupos de conductores

Estos permisos se clasifican, según sea el uso del vehículo para actividad profesional o no, en dos grupos:

## INTRODUCCIÓN

- **Grupo 1 (G1):** conductores titulares (no profesionales) que soliciten la obtención o prórroga del permiso de conducción de las clases AM, A1, A2, A, B, B + E o LCC.
- **Grupo 2 (G2):** conductores titulares (profesionales) que demanden la obtención o prórroga del permiso de conducción de las clases BTP, C1, C1 + E, C, C + E, D1, D1 + E, D o D + E.

### 1.4.1.3 Vigencia del permiso

La vigencia del permiso y de la licencia de conducción según el artículo 12 del reglamento para las clases BTP, C1, C1 + E, C, C + E, D1, D1 + E, D y D + E es de cinco años mientras el titular no cumpla los sesenta y cinco años y de tres años a partir de esa edad. Las clases restantes de permisos y licencias, tendrán un período de vigencia de diez años mientras su titular no cumpla los sesenta y cinco años y de cinco años a partir de esa edad.

Estos períodos pueden reducirse si el titular padece alguna enfermedad o deficiencia que, si bien de momento cumple con los requerimientos mínimos exigidos, es susceptible de agravarse.

### 1.4.1.4 Tipos de permiso

Según el Artículo 46 del reglamento, los permisos y licencias de conducción se tipifican en función de las aptitudes psicofísicas de los conductores en:

- **Extraordinario:** cuando las personas estén afectadas por enfermedad o deficiencia que determine la obligatoriedad de adaptaciones (espejo interior panorámico o retrovisor adaptado), restricciones de circulación u otras limitaciones (disminución del periodo de vigencia)
- **Ordinario:** en caso contrario.

### 1.4.1.5 Protocolo de exploración

Las capacidades visuales que se evalúan en los centros psicofísicos de reconocimiento son:



- **Agudeza visual:** es uno de los parámetros que queda perfectamente definido en cuanto a sus puntos de corte, diferenciando visión binocular y monocular. Se toma la agudeza visual estática sin y con corrección, considerando la línea en la que al menos alcance el 75% de aciertos.
- **Afaquia y pseudoafaquia:** estos casos deben ser valorados por el oftalmólogo y depende de su criterio la evaluación de la posible repercusión de la afaquia y pseudoafaquia sobre otros parámetros de la visión (sensibilidad al contraste, al deslumbramiento, proceso degenerativo asociado a la edad, etc).
- **Cirugía refractiva:** se valora que haya transcurrido más de 12 meses desde la intervención, el defecto prequirúrgico corregido y el estado postquirúrgico.
- **Campo visual:** se considera uno de los parámetros más importantes para la conducción. Para su exploración se valora de forma binocular, teniendo en cuenta únicamente los escotomas que coincidan en ambos ojos. La iluminación se aumenta para la exploración del campo periférico y en conductores mayores de 75 años.
- **Tiempo de recuperación al deslumbramiento:** se mide el tiempo que transcurre al ser sometido a una fuente de luz entre 1000-1500 lux emitida a una distancia de 5 metros.
- **Visión mesópica:** es una capacidad difícil de valorar debido a la falta de medios adecuados y el tiempo que requiere su realización. En caso de que el oftalmólogo lo considere derivará al paciente a un centro especializado para realizar el estudio en profundidad.

- **Motilidad del globo ocular:** Se descarta la existencia de diplopía.

Además, si en la revisión el oftalmólogo advierte cierta alteración de interés que pudiera deteriorar alguna capacidad visual, podría reducir el periodo de prórroga o renovación, limitaciones de conducción u otras condiciones restrictivas.

Este protocolo de exploración se puede realizar de una forma más específica en aquellos sujetos que se encuentran en una situación de mayor riesgo, como por ejemplo: patologías asociadas (glaucoma, retinopatías, cirugías...), edad del individuo (presbicia, cataratas, degeneración macular asociada a la edad), clase de permiso de conducir y hábitos de conducción (permisos profesionales, mercancías peligrosas...), ingesta de medicamentos y sustancias legales y no legales (drogas).

### **1.4.1.6 Valores de corte según la normativa**

A continuación, se describen los valores de corte según la normativa presente para las dos capacidades visuales valoradas en esta Tesis Doctoral: AV y SC.

#### **1.4.1.6.1 Agudeza visual**

Los valores mínimos de corte se definen en función de la agudeza visual binocular y de la visión monocular (agudeza visual inferior a 0,1 en un ojo), estableciendo diferentes límites según la clase de permiso y el grupo al que pertenece. Así, la AV binocular mínima exigida para el G1 (conductores no profesionales) es 0.5. Este grupo admite visión monocular, pero con una modificación en el tiempo del reconocimiento periódico según criterio médico.

Por otro lado, el G2 (conductores profesionales) presenta una agudeza binocular mínima de 0,8 con graduación en gafas no superior a 8 dioptrías (D), no admitiéndose, en estos casos, visión monocular.

En ambos grupos (G1 y G2), para los permisos ordinarios (conductores sanos), no se admite cirugía refractiva distinta a la cirugía de cristalino (afaquia y pseudoafaquia), por tanto, en caso de haberse realizado alguna intervención

quirúrgica pertenecerían al tipo de permiso extraordinario. Pasado un mes de la cirugía para el G1 o tres meses para el G2, se podrá obtener o prorrogar el permiso o licencia, con un período de vigencia máximo de un año. Trascurrido un año desde la intervención y según la pauta oftalmológica se establecerá el período de vigencia anterior.

#### 1.4.1.6.2 *Sensibilidad al contraste*

No se debe presentar alteraciones significativas en la capacidad de recuperación al deslumbramiento ni alteraciones de la visión mesópica para ninguno de los dos grupos. En el caso de padecerlas, sólo serían admitidos en el G1 incorporando las restricciones y limitaciones que, según criterio oftalmológico, sean requeridas para garantizar la seguridad durante la conducción.

#### 1.4.2 *Relación entre visión y accidentes de tráfico*

El análisis del impacto de la calidad de la visión en la conducción puede hacerse desde diferentes puntos de vista. En primer lugar, se encuentran los métodos epidemiológicos retrospectivos. Esta metodología permite descubrir si los conductores con visión reducida han sufrido más accidentes automovilísticos o, por el contrario, si aquellos que gozan de mejor visión sufren menos accidentes. El segundo enfoque, consiste en la monitorización y análisis de las correlaciones entre visión y conducción. El tercer método y, probablemente el que más información proporciona, consiste en manipular experimentalmente la calidad de la visión de un sujeto y cuantificar sus efectos en la capacidad de conducción. Al utilizar siempre al mismo observador, este método logra suprimir la variabilidad debida al uso de diferentes sujetos en los anteriores métodos. Además, este método puede implementarse en un circuito cerrado de conducción, tal y como hizo la profesora Wood en Australia (109), o utilizando un simulador de conducción (110, 111). Los tres enfoques han sido empleados en diferentes investigaciones, y todos sugieren que el rendimiento en la conducción se ve negativamente afectado por una calidad de visión reducida.

## INTRODUCCIÓN

En cuanto a la conducción nocturna, los estudios más relevantes son aquellos que muestran la pobre calidad óptica del ojo en condiciones de bajos niveles de luz y cómo este hecho incrementa el peligro en la tarea de conducción (112, 113). De acuerdo con los estudios epidemiológicos, las probabilidades de sufrir un accidente de noche son de 2 a 4 veces superiores a tenerlo de día (114, 115). Los peatones también tienen más riesgo de accidentes por la noche: entre 3 y 7 veces mayor que por el día según Sullivan y Flannagan (116). Estas investigaciones apuntan a un preocupante aumento del número de accidentes automovilísticos por la noche debido a la visibilidad reducida. De acuerdo con estos mismos estudios, la edad es otro factor clave: los accidentes en los que se encuentran involucradas personas de edad avanzada aumentan de manera no lineal durante la conducción nocturna (96, 109, 117, 118).

Entre los pocos estudios experimentales de conducción nocturna, destaca el de Allen (119), en el que se estudia cómo a medida que disminuye la iluminación de la retina por la interposición de lentes monocromáticas, disminuye también la distancia a la que se detectan los objetos en la carretera. En particular, se observó un descenso significativo en la distancia de detección nocturna con una transmitancia en torno al 70%. Así pues, se pusieron de manifiesto los efectos que pequeñas disminuciones de la iluminación vial pueden provocar sobre la detección de obstáculos en la carretera. En la misma línea, una investigación alemana comprobó que los cristales tintados de los vehículos, que también limitan la transmitancia, reducen en un 10% la distancia de detección de riesgos al volante. Finalmente, cabe destacar que las gafas comunes (lentes oftálmicas) suelen reflejar entre el 6% y el 9% de la luz que incide sobre ellas (120). Todas estas reflexiones de baja intensidad apenas influyen en la visión diurna, sin embargo, durante la noche pueden ser apreciables debido a la reflexión de luces brillantes (como las de los faros de los coches) sobre fondos oscuros. Por ello, al conducir por calles con poca iluminación, las reflexiones de faros demasiado brillantes pueden ser perjudiciales. Mediante el uso de capas antirreflejantes es posible reducir la cantidad de luz reflejada por las lentes oftálmicas a niveles inferiores al 4% y, de esta manera, aumentar su

transmitancia. No obstante, más relevante para la conducción que el aumento de la transmitancia es la reducción de la reflectancia (121, 122).

Diferentes estudios subjetivos apuntan a una mejora de la visión gracias al uso de gafas con antirreflejantes (121, 123). Sin embargo, es posible que los reflejos en las lentes oftálmicas produzcan un impacto visual únicamente en circunstancias especiales. Esto permitiría explicar por qué otro estudio no encontró ningún efecto de los antirreflejantes en la visión en condiciones simuladas de conducción nocturna (124).

Por otro lado, múltiples estudios demuestran que el color de la indumentaria de los peatones es un factor de riesgo en la conducción nocturna (los tonos oscuros son más difíciles de detectar), así como es importante considerar la iluminación que emplean los vehículos (115, 125, 126). Todas estas investigaciones comparten un mismo mensaje: la detección de objetos (como señales de tráfico, peatones u otros riesgos) empeora con la disminución de la luminosidad. En particular, los datos de Allen indican que en conducción nocturna pequeñas modificaciones de la luminosidad implican modificaciones significativas en la distancia a la que el conductor detecta los objetos (119).

#### **1.4.3 Caracterización visual en conducción nocturna y diurna**

La esencial disparidad entre la visión durante la conducción nocturna y diurna es la diferencia entre las luminancias de los objetos que se observan en ambas condiciones de iluminación. Particularmente durante la noche, el rango de luminancia es muy amplio con una relación de 16 millones a 1 (por ejemplo 0,02 candelas para una zona relativamente oscura de la calzada, y 40.000 candelas para los faros de un coche que se aproxima), mientras que durante el día la relación máxima entre luminancias es de 100 a 1 (127).

Para adaptarse a cambios de luminancias, el sistema visual humano está previsto de tres mecanismos fisiológicos (2, 128). El primero de ellos es el procesado de adaptación neuronal a la señal (en un intervalo de microsegundos) produciendo una adaptación máxima de varios millones de unidades de luz. El

## INTRODUCCIÓN

siguiente, es el cambio del tamaño pupilar que opera en el rango de las décimas de segundo y produce un cambio máximo de 16 a 1. Estos dos mecanismos ayudan al sistema visual de una manera rápida para evitar el deslumbramiento producido por cambios bruscos de iluminación. Finalmente, el mecanismo bioquímico, en este caso de los fotorreceptores bastones, completa la adaptación a los distintos niveles de luminancia.

Para concluir, se destaca que la característica más importante de la visión nocturna durante la conducción es la enorme variación en luminancias de los objetos que se presentan en escena. El sistema visual se adapta a esos cambios de luminosidad mediante variaciones del tamaño pupilar, mecanismo bioquímico y, sobre todo, mediante el procesamiento neuronal de las diferentes señales recibidas.

### 1.4.4 Conducción y edad

Debido a los cambios relacionados con la edad en los procesos ópticos y neurales, las personas de mayor edad perciben pérdidas más severas en la percepción visual en condiciones de visión nocturna que en condiciones diurnas (96). Además, debido a la disminución del nivel de confianza producido por la reducción de las capacidades visual, cognitiva y funcional asociadas a la edad, muchos conductores mayores restringen su exposición a la conducción en una serie de situaciones (129). En este sentido, se sabe que los cambios fisiológicos que experimenta el sistema visual con la edad pueden influir en la actitud y nivel de accidentabilidad (130). Además, según diversos estudios, el riesgo de colisión de los vehículos conducidos por mayores de 65 años se eleva al máximo cuando esta persona sufre cataratas, glaucoma, retinopatías o DMAE, algo que ocurre con demasiada frecuencia en esta franja de edad (71, 96, 107).

Acorde con los datos de la DGT, en España en 2019 había 27.303.561 conductores con licencia; el 13% de los conductores españoles eran mayores de 65 años. Es decir, cerca de 3 millones de conductores son pensionistas; de estos, más de 1,3 millones son mayores de 74 años. Dado que la población española está envejeciendo, los próximos años se verá cómo aumenta el porcentaje de personas mayores al volante.

Según el Instituto Nacional de Estadística, en 2049, el 30% de la población española tendrá más de 65 años. Hay que asumir que España está sumida en un proceso de envejecimiento demográfico, al tiempo que la esperanza de vida aumenta y, además, las personas de avanzada edad cada vez prolongan más su vida laboral y llevan una vida mucho más activa que la de hace dos o tres generaciones.

Día tras día se van sucediendo diferentes accidentes en los que una persona mayor de 65 años se ve implicada. Siempre que esto ocurre, vuelve a surgir el debate sobre la necesidad de limitar, o no, su licencia de conducir. Se debe tener en cuenta que, conforme a la DGT desde 1995 hasta el año 2015, hay siete veces más conductores mayores de 65, llegando hasta los 1,4 millones.

Por ello, el permitir o no la conducción a estas personas se vuelve un asunto muy debatido. En algunos casos, no solo ponen su vida en peligro, sino también la del resto de conductores. Es difícil encontrar el equilibrio entre la restricción de la conducción como consecuencia de mala visión y el derecho a conducir, como parte de una vida libre y autónoma.

Por lo general, ese segmento de población es muy prudente; pero ello no niega que sus funciones sensoriales, motoras y cognitivas se ven disminuidas en gran medida. Dado que España es un país sumamente extenso, con cerca de 9.000 municipios y amplias áreas de zonas rurales, gran parte de estos conductores (94%) usan su vehículo de manera diaria, según los datos proporcionados por la DGT.

Teniendo en cuenta que no sería ético ni justo negar el carnet de conducir a una persona por su edad, sin tener en cuenta sus características psicofísicas, es necesario analizar cómo se podrían reforzar los controles de este tipo de conductores.

En primer lugar, en el espacio temporal (una revisión cada cinco años es demasiado tiempo en esas franjas de edades) y, en segundo lugar, en su dureza y exactitud (las pruebas deben ser más concienzudas: si un mayor puede conducir, debe ser únicamente porque sus condiciones físicas no le diferencian

## INTRODUCCIÓN

de otro más joven y debe ser el especialista quien lo autorice). Este último punto es uno de los principales objetivos de esta Tesis Doctoral.

Cabe comprender, acorde con lo explicado anteriormente, que durante la conducción se vuelve imprescindible que las capacidades visuales, auditivas y motoras del conductor funcionen correctamente para poder proceder a la toma de decisiones rápidas. Además, el uso de fármacos (algo frecuente a ciertas edades) muchas veces influyen negativamente en las habilidades conductoras y, en muchos casos, ni siquiera son compatibles con la conducción (131, 132).

Como ya se ha comentado, según la DGT un 67% de las personas mayores de 65 años siente inseguridad al conducir, ya que detecta que sus condiciones psicofísicas no están tan bien como en el pasado. Sin embargo, en 2009, el Gobierno llevó a cabo un cambio normativo (Real Decreto 818/2009) prolongando la periodicidad de las revisiones a cinco años, en lugar de cada dos, como era hasta entonces. Era una imposición europea que España debió cumplir. Eso sí, las consecuencias prácticas es que, ahora, es en el examinador en el que recae la necesidad de ser prudente y establecer restricciones al examinado, en este caso, limitando y acortando el tiempo de renovación de la licencia.

Teniendo en cuenta que, a estas edades, las condiciones físicas de las personas cambian muy rápidamente, prolongar la vigencia de su carnet de conducir y equipararla con la de las personas jóvenes implica grandes riesgos, y así lo han hecho saber diferentes entidades competentes en la materia. Así, restringir su capacidad de conducir podría tener, en muchos casos, unas consecuencias muy negativas para el día a día de esas personas, se ve como imprescindible endurecer las revisiones a las que se someten y asegurar que se ponen en carretera con la mayor seguridad posible.

De acuerdo a estadísticas de la DGT, en 2015 el 99,5% de los conductores de más de 75 años que se presentaron a las revisiones psicotécnicas para la renovación del carnet de conducir fueron considerados



aptos, aunque a gran parte de ellos solo se les aplicaron restricciones de velocidad.

Un estudio de Fundación Línea Directa (133) analizó la accidentabilidad entre 2009 y 2014 del segmento de población de mayores de 65, en comparación con el resto de grupos de edad. Mientras que la tasa de accidentabilidad de este segmento es cuatro veces menor que la de la muestra, su tasa de mortalidad es 2,5 veces superior. El accidente más frecuente es una salida de vía en carretera convencional (cabe destacar que son núcleos poblacionales muy pequeños aquellos donde más licencias hay de mayores de 65 años y el uso del vehículo se reduce a labores diarias). Sin embargo, si se les pregunta a las familias, 4,4 millones (un 17% del total) estarían dispuestos a retirar el carnet a sus familiares mayores de 65 y 7,7 millones de conductores (un 29,5% del total) ve como peligrosa su presencia en carretera, ya que un 40% (10,4 millones) confiesa haber vivido situaciones de riesgo por su culpa. En lo que coinciden tanto usuarios mayores de 65 como el resto de conductores, es que las pruebas psicotécnicas son poco rigurosas y 7 de cada 10 encuestados creen que se debería revisar el estado del conductor año a año.

Quizá la solución pase por un incremento de las pruebas psicofísicas a este segmento de la población, objeto de esta Tesis Doctoral, y utilizando lo que está permitido por la legislación, la inclusión de restricciones en la conducción que, si bien permiten a la persona mantener su autonomía, logran reducir el peligro al que se someten a la hora de conducir. Por ejemplo, que únicamente puedan alcanzar determinada velocidad, que solo puedan conducir por determinadas carreteras y determinadas distancias o que únicamente estén habilitados para la conducción diurna.

### 1.5 Filtros ópticos

Para finalizar esta introducción, se ha reservado un apartado para hablar de aspectos generales de los filtros, ya que han sido incluidos en el material utilizado de esta Tesis Doctoral.

Es posible modificar la distribución espectral de una fuente mediante el uso de filtros. Éstos se caracterizan de acuerdo a su capacidad para absorber, transmitir y reflejar la luz (8). Así pues, la radiación electromagnética que llega a un filtro puede ser absorbida en forma de calor, reflejarse en la misma dirección (sentido opuesto) o transmitirse a través del filtro (10, 134). La proporción de energía absorbida, reflejada y transmitida con respecto al total, determinan los coeficientes de absorbancia o absorción espectral ( $\alpha_\lambda$ ), reflectancia o reflexión espectral ( $\rho_\lambda$ ) y transmitancia o transmisión espectral ( $\tau_\lambda$ ), respectivamente. Cada uno de estos tres factores es menor que la unidad, y su suma es igual a uno. Cuando se añade el adjetivo “espectral” se quiere subrayar que el coeficiente depende de la longitud de onda (2).

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$$

**Fórmula 3. Relación entre absorbancia, reflectancia y transmitancia**

Habitualmente estos coeficientes se expresan en porcentaje en vez de en tanto por uno, de tal modo que la suma de los tres sería igual al 100 (8). Sin embargo, normalmente los filtros se caracterizan únicamente por su transmitancia o factor de transmisión espectral ( $\tau_\lambda$ ). También es común utilizar la densidad óptica espectral ( $D_\lambda$ ), que se define como (2):

$$D_\lambda = -\log_{10} \tau_\lambda$$

**Fórmula 4. Relación entre la densidad óptica espectral y la transmitancia**

Así pues, un filtro que tenga una densidad óptica de 1 sólo transmite una décima parte de la energía que le llega, un filtro de densidad óptica 2 transmite una centésima, si es de densidad óptica 3 una milésima, y así sucesivamente. La razón última del uso de esta escala es la llamada ley de Weber-Fechner (135) que hace referencia a la manera en que el ser humano percibe la mayoría de los estímulos externos tales como estímulos olfativos, gustativos, táctiles, auditivos (escala decibélica) y, en este caso, visuales. Así pues, la densidad óptica de varios filtros superpuestos viene dada por la suma de las densidades individuales de los filtros (para la misma longitud de onda).

La siguiente figura expone la diferencia entre la transmisión de luz en un ojo con y sin interposición de un filtro que impide el paso de longitudes de onda inferiores a 511 nm.

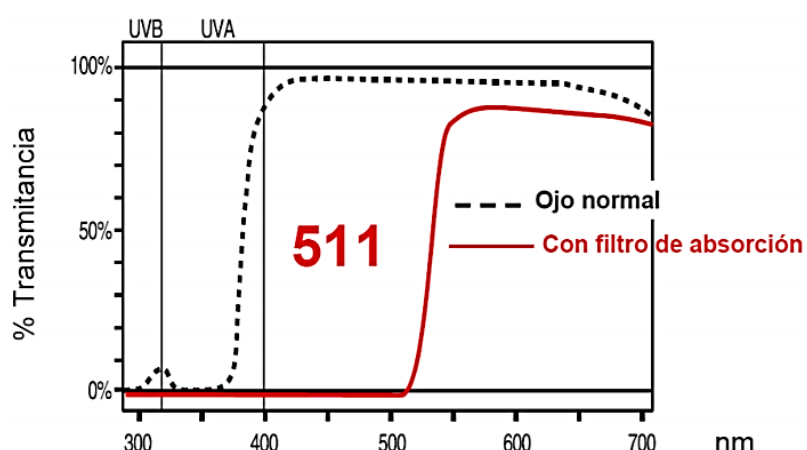


Figura 39. Transmitancia normal en el ojo y transmitancia de un filtro de longitud de onda de corte de 511nm. Tomado de Sánchez-Ramos 2010.

También existen filtros de densidad óptica neutra, que reducen por igual la intensidad de todas las longitudes de onda. Éstos se clasifican en polarizadores y filtros grises. En rigor, disminuyen el brillo de la imagen sin modificar el tono, ya que cambian en la misma proporción todos los colores y, además, pueden tener un corte de protección para longitudes de onda  $\leq 390$  nm. Los filtros grises disminuyen la luz incidente en una fracción determinada. Los

## INTRODUCCIÓN

filtros polarizadores se componen de dos filtros idénticos denominados polarizador y analizador. Cada uno de ellos permite únicamente el paso de la luz que oscila en un plano paralelo a la configuración microscópica del material. Al girar el analizador, los planos se alinean progresivamente haciendo que la imagen resulte más clara (8).

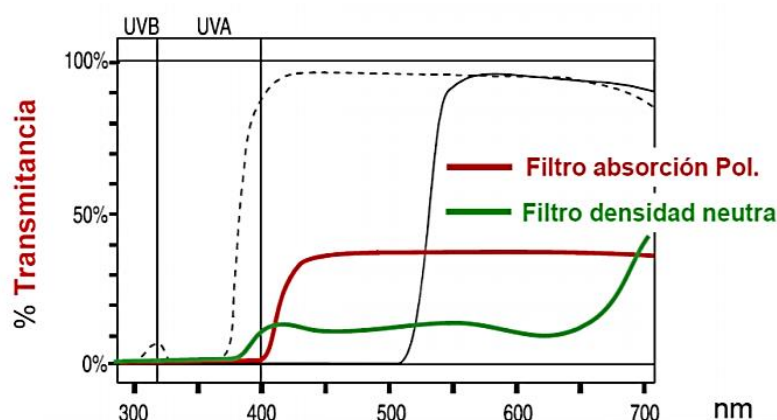


Figura 40. Curvas de absorción espectral de filtros. Tomado de Sánchez-Ramos 2010.

Con esta breve reseña sobre filtros, finaliza la introducción de esta Tesis Doctoral. A continuación, se desarrolla la justificación, hipótesis y objetivos de este estudio.

# JUSTIFICACIÓN

---



## 2 JUSTIFICACIÓN

En condiciones de iluminación mesópica o condiciones ambientales adversas, la información visual disminuye, la discriminación de contornos empeora, aumenta la probabilidad de sufrir deslumbramiento y existe una pérdida sustancial de la percepción del color. A pesar de que durante la noche (entre las 20:00 h y las 8:00 h) existe una menor afluencia de tráfico, en esta franja horaria se registra un alto número de víctimas mortales en accidentes de tráfico, pudiendo ser una de las causas de este incremento la reducción de la función visual que se produce en estas condiciones de iluminación.

La valoración de la agudeza visual y de la sensibilidad al contraste para la conducción nocturna debe ser una prioridad en la normalización y baremo de la exploración de conductores para la concesión y renovación del permiso de conducir. Por ello, es de vital importancia plantear la evaluación del estado visual mesópico en el ámbito de la exploración específica de conductores. Para evaluar la función visual en condiciones mesópicas se puede plantear la adaptación de la iluminación del gabinete de evaluación hasta niveles similares a los reales en conducción nocturna. Si bien esta técnica es viable, requiere de un proceso de normalización y calibrado de difícil implementación en los miles de centros de reconocimiento médico. Esta investigación es necesaria, por un lado, puesto que el incremento de la esperanza de vida permite que personas de elevada edad mantengan el permiso de conducción y, por otro lado, por el crecimiento de conductores que realizan desplazamientos en conducción nocturna.

Esta Tesis Doctoral se justifica por la necesidad de implementar en los centros de reconocimiento psicotécnicos, para la obtención y renovación del permiso de conducción, la valoración específica de la función visual en condiciones de baja iluminación (conducción nocturna). Se proponen métodos psicofísicos de exploración que permitan inferir la función visual mesópica a partir de valoraciones de agudeza visual y sensibilidad al contraste realizadas en condiciones fotópicas, sin y con la interposición de filtros.





## HIPÓTESIS

---



### **3 HIPÓTESIS**

La predicción de la agudeza visual mesópica de los conductores de vehículos se puede lograr en un entorno de iluminación ambiental fotópica; mediante métodos psicofísicos de simulación. Para ello, se utilizan optotipos de agudeza visual de diferentes contrastes Weber y test de sensibilidad al contraste, combinados con la interposición de filtros de densidad neutra con diferentes absorbancias.



## OBJETIVOS

---



## 4 OBJETIVOS

### 4.1 Objetivo general

Encontrar un predictor de la función visual mesópica mediante métodos psicofísicos de evaluación fotópica utilizando elementos de simulación.

### 4.2 Objetivos específicos

1. Valorar la agudeza visual mesópica con optotipos de contraste Weber del 100%.
2. Evaluar la agudeza visual fotópica con optotipos de contraste Weber del 100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%, sin y con la interposición de filtros de densidad óptica neutra 70%, 80% y 90%.
3. Correlacionar las agudezas visuales fotópicas para diferentes contrastes sin y con interposición de filtros, con la agudeza visual del 100% de contraste valorada en condiciones mesópicas.
4. Evaluar la función de sensibilidad al contraste mesópica.
5. Medir la sensibilidad al contraste fotópica, sin y con la interposición de filtros ópticos de densidad de 70%, 80% y 90%.
6. Correlacionar la función de sensibilidad al contraste valorada en condiciones fotópicas sin y con la interposición de filtros, con la función de sensibilidad al contraste valorada en condiciones mesópicas.
7. Conocer la influencia de la edad y comparar los resultados obtenidos entre los dos grupos de edad: mayores y menores de 50 años.
8. Seleccionar el mejor predictor fotópico, para la evaluación de la agudeza visual mesópica, en función de la edad.
9. Encontrar el mejor predictor fotópico, para la valoración de la sensibilidad al contraste mesópica, en función de la edad.





## MATERIAL Y MÉTODO

---



## 5 MATERIAL Y MÉTODO

A continuación, se expone el apartado de material y método utilizado en el desarrollo de esta investigación.

### 5.1 Muestra

El tamaño muestral se calculó a partir de los datos de un estudio piloto en el que se evaluó la AV y la SC fotópicas en 30 personas. Como error muestral admisible se tomó un valor de 0,2 y un nivel de confianza 0,95. Ante la posibilidad de que se produjeran pérdidas, el tamaño muestral se aumentó en un 10%. El resultado del estudio piloto indicó que el tamaño muestral debía ser de 56 personas.

La muestra de participantes para esta Tesis Doctoral estuvo formada por un grupo de voluntarios conductores de ambos sexos, constituido por 56 participantes (37,50% hombres y 62,50% mujeres) con edades comprendidas entre 20 y 71 años, siendo la media de edad de  $44,01 \pm 18,42$  años.

#### 5.1.1 Criterios de inclusión

1. Estar en posesión de un permiso de conducción vigente en España.
2. Haber otorgado el consentimiento informado.
3. Utilizar la compensación óptica habitual para visión de lejos, en caso necesario.

#### 5.1.2 Criterios de exclusión

1. Padecer patologías sistémicas y oculares.
2. Haber sido sometido a cirugía refractiva en un periodo inferior a un año.

### 5.2 Material

La investigación que ha dado lugar a esta Tesis Doctoral requirió de las siguientes instalaciones y material técnico para su realización:

- Sala de exploración (4 x 6,4 x 3 m).
- Luxómetro digital MAVOLUX 5032B USB (Gossen Metrawatt).
- Panel retro iluminado de AV. (ETDRS Illuminator Cabinet™ Precision Vision) con láminas de diferentes niveles de contraste Weber: 100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%.
- Test Mixed Contrast/Variable (100% y 20%) Distance Colenbrander Vision Chart. (Precision Vision).
- Panel CSV 1000 retro iluminado de SC. Test Instrument Viewer. (Good Lite).
- Filtros de diferentes densidades ópticas (90%,80%,70%).
- Frontofocómetro. Zeiss Humphrey lens analyzer lensmeter modell 360 (Zeiss).

Los siguientes epígrafes tratan de las instalaciones y de su acondicionamiento, en este caso se hizo especial hincapié en las condiciones de iluminación ya que se trata de una variable imprescindible a considerar en este estudio. Se especifica, la caracterización lumínica de la sala de exploración. Además, en este mismo apartado de “Material” se explica pormenorizadamente los test seleccionados para la valoración de la función visual.

#### 5.2.1 Sala de exploración

La búsqueda y selección del espacio donde realizar las pruebas fue la primera tarea a realizar. Se trató de encontrar una instalación en donde se pudieran simular las condiciones de iluminación de la conducción nocturna. Para acondicionar la instalación a las condiciones de iluminación mesópica requeridas, en primer lugar, se cubrió una ventana con placas de plástico negro mate (Oracal 50-631). La disposición de la sala, se muestra en las imágenes siguientes.



Figura 41. Recreación de la disposición de los elementos de la sala de exploración. Elaboración propia.



Figura 42. Recreación de la disposición del participante y del optometrista. Elaboración propia.

## MATERIAL Y MÉTODO

La sala de exploración, con unas dimensiones de 4 m x 6,40 m y una altura de 3 m, incluía los dispositivos fundamentales para la realización del estudio (mesa, sillas, tests, frontofocómetro, etc.). La sala se iluminó con una lámpara halógena vertical regulable, con cabezal de proyección de luz difusa hacia el techo, con el fin de evitar luz directa sobre los test empleados. Con el fin de conseguir las dos condiciones lumínicas (mesópica y fotópica), así como de controlar el nivel de luminancia se empleó el regulador de intensidad de luz de la lámpara.

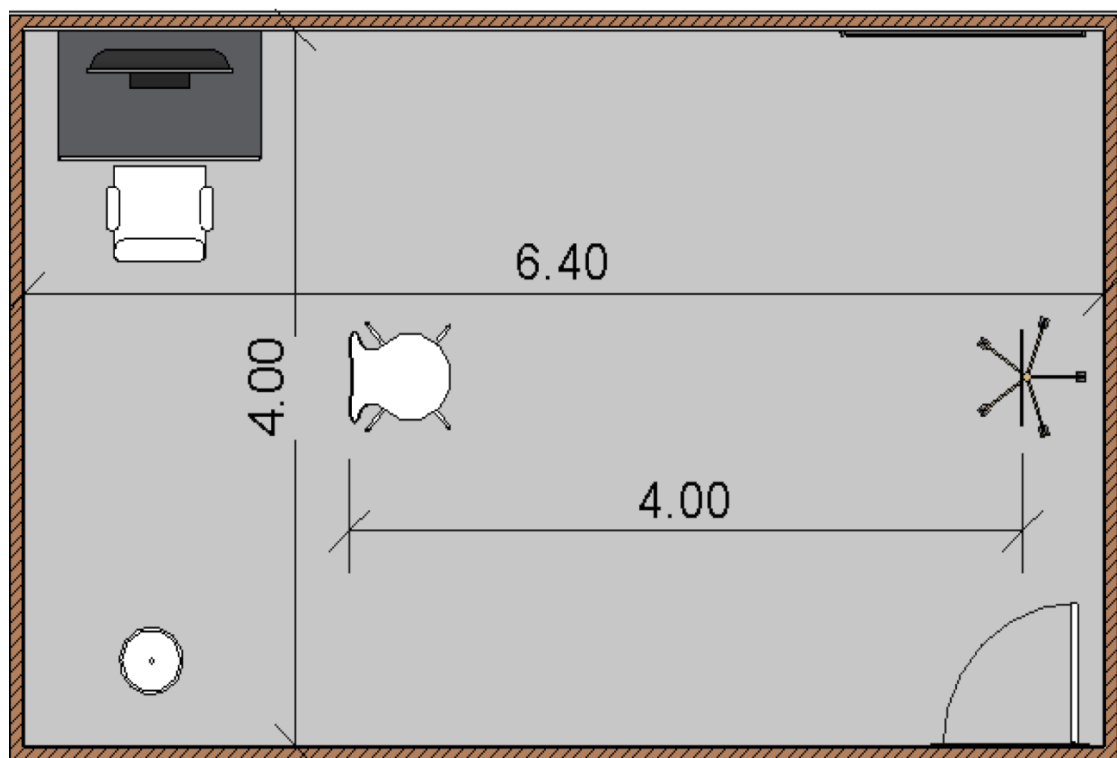


Figura 43. Plano y medidas de la sala de exploración. Elaboración propia.

### 5.2.2 Luxómetro digital Mavolux 5032B USB

Para estimar la luminancia se empleó un luxómetro digital Mavolux como el de la figura, calibrado según la normativa para valorar niveles de iluminancia (lux) y con un adaptador de luminancia (candelas/m<sup>2</sup>).



**Figura 44.** Luxómetro Mavolux, modelo 5032B USB Gossen, con el adaptador para medir luminancias en cd/m<sup>2</sup>. Cortesía de Aguirre Bueno, 2012.

#### 5.2.2.1 Condiciones de iluminación ambiente

Para la elaboración de esta Tesis Doctoral se emplearon dos niveles de iluminación (mesópico y fotópico). La condición fotópica empleada fue de 120 cd/m<sup>2</sup>. La decisión se tomó en base a que la agudeza visual es máxima y permanece en realidad constante a partir de este valor (52, 136). Asimismo, se encuentra dentro del rango de 80-320 cd/m<sup>2</sup>, recomendado en el protocolo ETDRS de determinación de la agudeza visual (descrito en el apartado correspondiente) (44).

La iluminación mesópica seleccionada fue de 0,8 cd/m<sup>2</sup>. De igual manera se basó en criterios de agudeza visual. Para el rango inferior a 0,04 cd/m<sup>2</sup> la agudeza visual se mantiene constante, pero muy disminuida (52, 136). Adicionalmente, este valor se encuentra dentro del rango de mesópico (0,05-5 cd/m<sup>2</sup>).



Figura 45. Sala de pruebas en condiciones de iluminación fotópica.

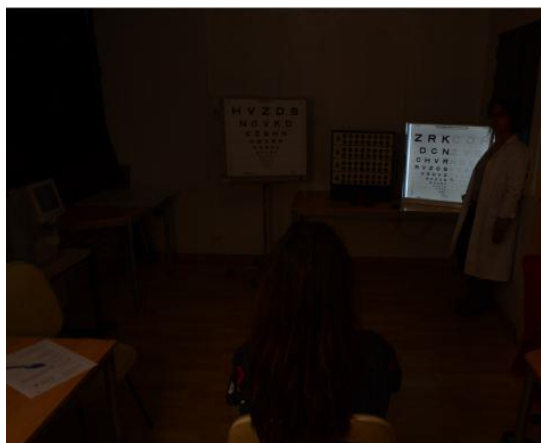


Figura 46. Sala de pruebas en condiciones de iluminación mesópica.

### 5.2.3 Test ETDRS retroiluminado

Para la valoración de la AV se ha utilizado el test ETDRS retroiluminado (Illuminator Cabinet™ Precision Vision). Se ha empleado el test de Presentaba láminas de diferentes niveles de contraste Weber: 100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25% y panel Mixed Contrast/Variable (100% y 20%) Distance Colenbrander Vision Chart. (Precision Vision).

La elección de los test se basó en que su formato está validado, estandarizado y aceptado para estudios clínicos por el National Eye Institute y por la Food and Drug Administration (FDA) estadounidenses. Como ya se ha dicho en la introducción, los optotipos de escala logarítmica o de Bailey-Lovie, diseñados en la década de los 70, procuran alcanzar la máxima estandarización en la medida de la AV. Estos se han mostrado más precisos que las escalas de Snellen a la hora de medir la AV y se han convertido en el “patrón de oro” (*gold standard*) para la determinación de la AV en investigaciones clínicas (44, 45). Para ello cumplen con los siguientes requisitos:

- Mantener una progresión de 0,1 unidades logarítmicas.
- Presentar el mismo número de letras por cada nivel de AV.
- Tener una separación entre optotipos igual al ancho de los optotipos de la línea y una separación entre filas igual al alto de los optotipos de la fina inferior.



- Mantener el mismo nivel de contraste en cada nivel de AV.

Para la valoración de la agudeza visual fotópica se eligieron los paneles de optotipos 4 Meter (13ft.) SLOAN Original Series ETDRS Eye Chart "R", de Precision Vision, EE.UU. (láminas de 62 x 65 cm) de diferentes niveles de contraste Weber: 100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%.

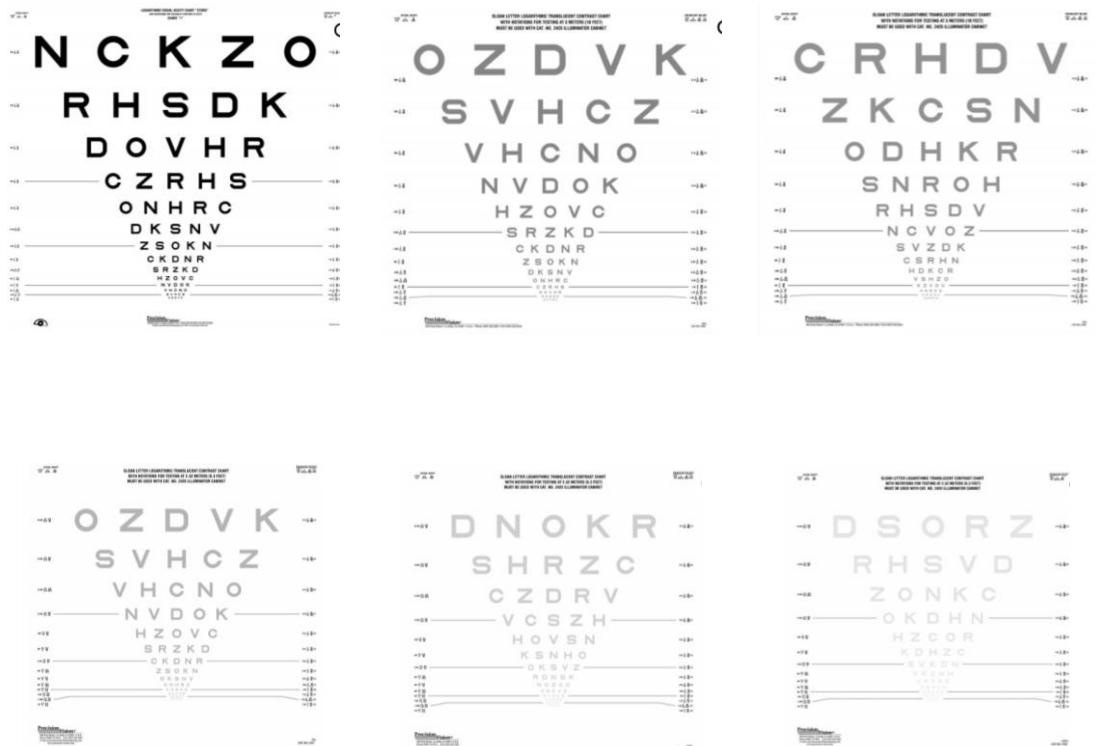


Figura 47. SLOAN Original Series ETDRS Eye Chart "R", de Precision Vision, EE.UU. De izquierda a derecha y de arriba abajo, los contrastes Weber son 100%, 20%, 10%, 2,5% y 1,25%. Tomado de [www.precisionvision.com](http://www.precisionvision.com).

Cada una de ellas se soportaba en un dispositivo como el que se expone a continuación:

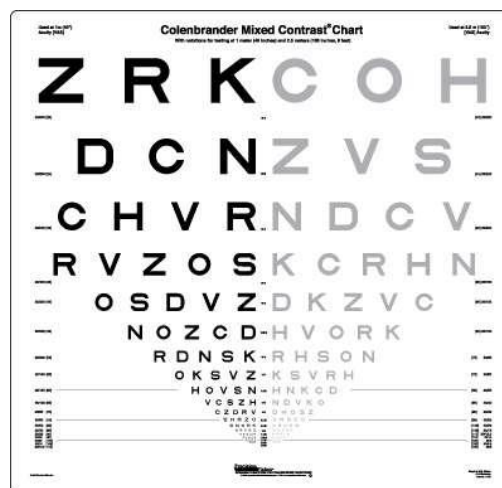
Para la medida de la agudeza visual mesópica se utilizó el test "Mixed Contrast/ Variable Distance Colenbrander Vision Chart" de Precision Vision, caracterizado por presentar optotipos en escala logarítmica o de Bailey-Lovie expresando las medidas en unidades de Visual Acuity Score (VAS), en panel

## MATERIAL Y MÉTODO

retroiluminado. El optotipo utilizado presenta 2 niveles de contraste: 100% de contraste y 20% de contraste Weber. Con objeto de seguir las indicaciones de la norma ISO 8596:2010, acerca de la relación de luminancias entre optotipo y fondo, para la medida de la AV mesópica se utilizó un filtro de densidad óptica neutra Rosco e-colour 211 (Rosco-Ibérica S.A., España) de transmitancia 13,7% que proporcionaba una luminancia al optotipo de 5 cd/m<sup>2</sup>.



**Figura 48. ETRS Illuminator Cabinet. Detalle del soporte del panel. Tomado de [www.precisionvision.com](http://www.precisionvision.com)**



**Figura 49. Mixed Contrast/ Variable Distance Colenbrander. Vision Chart.ETDRS 100% y 20% de contraste utilizado. Tomado de [www.precision-vision.com](http://www.precision-vision.com)**

La distancia de evaluación (4 metros) también se basó en las recomendaciones de los dos organismos mencionados previamente (44). Con estos optotipos la valoración de la AV se realiza de forma lineal progresiva y es el método estándar de medida de AV utilizado en investigaciones clínicas. Cada línea posee 5 letras y cada tres líneas se duplica el ángulo visual. La AV se expresa como el logaritmo de la última fila completa leída más -0,02 por cada letra leída de la fila inferior. Como es sabido, una AV de 1 en escala logMAR equivale a una AV de 0,1 en escala decimal y una AV de 0 en logMAR equivale a una AV de 1 en escala decimal. Como puede observarse en esta notación, los valores numéricos más bajos indican una mejor AV.

### 5.2.4 Panel CSV 1000 retroiluminado

Para la realización de esta Tesis Doctoral se utilizó el test CSV-1000 Test Instrument Viewer. (Good Lite); test de franjas o fracciones de ondas de perfil sinusoidal de diferentes frecuencias espaciales, uno de los test más empleados para evaluar la función de SC.

Presenta cuatro frecuencias espaciales de 3 cpd, 6 cpd, 12 cpd y 18 cpd, situados en cuatro filas de manera que se representan dos láminas circulares en cada nivel de contraste para cada frecuencia espacial. Ambas están situadas una encima de otra, en una de las láminas se presenta la red sinusoidal mientras que la otra representa un patrón gris uniforme. Para cada frecuencia espacial se representan ocho niveles de contraste, en pasos de 0,14 unidades logarítmicas, en forma de columnas.

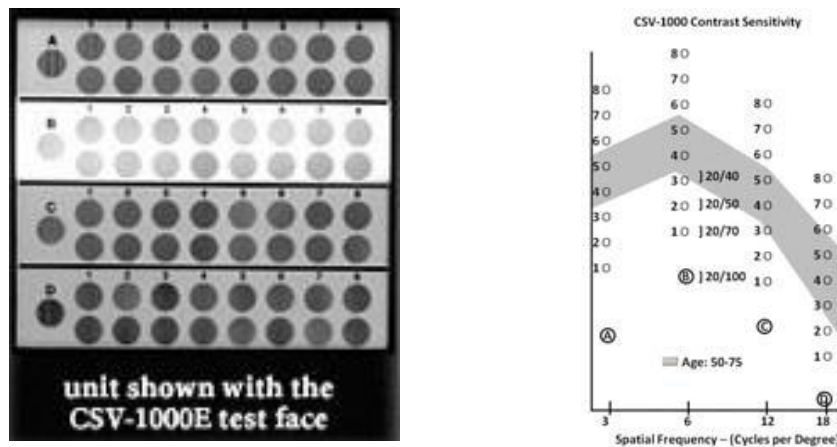


Figura 50. Optotipo CSV- 1000 para la valoración de la sensibilidad al contraste. Hoja de resultados del test CSV-1000. Tomado de [www.vectorvision.com](http://www.vectorvision.com)

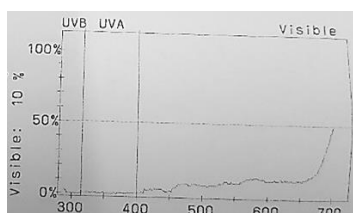
Este visor presenta, para minimizar el efecto de la iluminación en el resultado del test, una retroiluminación que proporciona una luminancia de 85  $\text{cd/m}^2$ . La retroiluminación se produce por una pantalla de luz difusa que controla la cantidad de iluminación en cada una de las filas. Para la evaluación de la percepción del contraste para cada frecuencia se dispone de un control remoto que permite la iluminación individual de cada una de las cuatro frecuencias.

### 5.2.5 Filtros de diferentes densidades ópticas

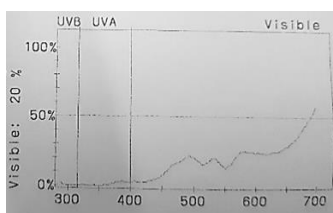
Los filtros utilizados en este estudio presentaban las siguientes características, con las siguientes curvas de transmitancia:

**Tabla 9. Características espectrales de los filtros utilizados (90%, 80% y 70%).**

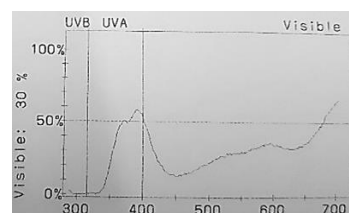
	Transmitancia	Absorción	Densidad óptica
Filtro 90%	10%	90%	0,9
Filtro 80%	20%	80%	0,8
Filtro 70%	30%	70%	0,7



**Figura 51. Curva de transmisión filtro 90%.**



**Figura 52. Curva de transmisión filtro 80%.**



**Figura 53. Curva de transmisión filtro 70%.**

### 5.2.6 Frontofocómetro con espectrofotómetro

Para medir la transmitancia de cada uno de los tres filtros utilizados en este estudio se utilizó el frontofocómetro con espectrómetro Zeiss Humphrey lens analyzer lensmeter modell 360.



**Figura 54. Frontofocómetro Zeiss Humphrey Lens Analyzer lensmeter. Modell 350.**

### 5.3 Método

#### 5.3.1 Diseño del estudio

Se trata de un estudio controlado y cruzado. El diseño cruzado responde a la condición de que a todos los participantes se les aplicaran todas las pruebas de determinación de la función visual seleccionadas y en todas las condiciones definidas, lo que permite ajustar las variaciones de persona a persona, haciendo que cada una sirva como su propio control.

Adicionalmente, a fin de evitar sesgos inter-examinadores, el examinador fue siempre el mismo.

#### 5.3.2 Medida de la iluminación ambiente

La valoración de la agudeza visual se realizó en una doble situación ambiental; por un lado, en condiciones de iluminación mesópica ( $0,8 \text{ cd/m}^2$ ) previa adaptación a la oscuridad durante 15 minutos y, por otro lado, en condiciones de iluminación fotópica ( $120 \text{ cd/m}^2$ ) tras un periodo de adaptación a la luz de 2 minutos. Las medidas de la luminancia fotópica y mesópica, registradas con el Luxómetro Mavolux, modelo 5032B USB Gossen, se midieron tanto en los tests y distintos optotipos, como en diferentes puntos de la sala. El adaptador de luminancia efectúa la medida, en  $\text{cd/m}^2$ , en un campo de  $20^\circ$ .

El tamaño de los paneles de optotipos de agudeza visual de lejos es de  $62 \times 65 \text{ cm}$ . Por tanto, para valorarlos de la forma más completa posible, el luxómetro se dirigió al centro de éste, a  $176 \text{ cm}$  de distancia ( $\text{tg}10=0,17633=31/x$ ;  $x=175,81 \text{ cm}$ ) y para el test de SC, de  $13 \times 18 \text{ cm}$ , a  $37 \text{ cm}$  ( $\text{tg}10=0,17633=6,5/x$ ;  $x=36,86 \text{ cm}$ ).

En el caso de la sala, la superficie total se dividió en cuadrículas de  $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ , valorando la luminancia en el centro de cada cuadrícula. Las mediciones se efectuaron a  $1 \text{ m}$  y  $1,5 \text{ m}$  de altura desde el suelo. El objetivo de estas determinaciones fue garantizar que la luminancia tanto de los paneles de optotipos y test de prueba de la función visual como de la sala (luminancia de fondo) fuera uniforme. Las medidas se tomaron con el detector en posición

## MATERIAL Y MÉTODO

horizontal, en dirección perpendicular a los paneles y test y a los distintos puntos de las paredes de la sala, por ser ésta la posición visual de los participantes que se iban a someter a las pruebas de la función visual.

Con objeto de seguir las indicaciones de la norma ISO 8596:2010, acerca de la relación de luminancias entre optotipo y fondo, para la medida de la AVM se utilizó un filtro de densidad óptica neutra Rosco e-colour 211 (Rosco-Ibérica S.A., España) de transmitancia 13,7% que proporcionaba una luminancia al optotipo de 5 cd/m<sup>2</sup>. Este se colocó entre la pantalla y el optotipo. Para la comprobación fotométrica del entorno y del optotipo se utilizó el luxómetro Mavolux 5032B USB (Mavo Monitor USB, Gossen, Nürnberg, GE).

### 5.3.3 Caracterización de los filtros

Para medir la transmitancia de cada uno de los tres filtros utilizados en este estudio se empleó el espectrómetro de fibra óptica de doble canal AvaSpec, de Avantes Inc., Países Bajos, con el detector AvaSpec, modelo ULS3648-UA-25.

### 5.3.4 Parámetros evaluados

Los parámetros de la función visual determinados en este estudio, que constituyen las variables dependientes, y que se describen más adelante fueron: la agudeza visual y la sensibilidad al contraste.

Ambos se registraron binocularmente, en condiciones de iluminación fotópica y mesópica (120 cd/m<sup>2</sup> y 0,8 cd/m<sup>2</sup>, respectivamente).

A fin de cumplir con el tercer criterio de inclusión en el estudio, todos los parámetros se registraron con la compensación óptica de cada participante para visión de lejos, según el caso.

Para las pruebas de la agudeza visual de lejos, el panel de optotipos se colocó, siguiendo las recomendaciones del protocolo ETDRS, sobre un atril, a 4

m desde los ojos del participante. A una altura valorada a partir del suelo (unos 130 cm), tal que los ojos de la persona sentada estuvieran en línea con la tercera línea de letras (0.8 logMAR) (44).

El método seguido para la determinación de la agudeza visual de lejos fue el recomendado en el protocolo ETDRS; esto es, se indicó al participante que leyera lentamente, de izquierda a derecha, la escala de optotipos de agudeza visual, comenzando por la primera línea, la de mayor tamaño. Cuando no podía identificar una letra, se le inducía a la elección forzada. Si dudaba entre dos posibles letras, se le pedía que se decidiera por una sola letra, aunque no estuviera seguro (paradigma de elección forzada). La prueba continuó hasta que era obvio que el participante no lograba reconocer cuatro o más letras de una línea o hasta que identificara perfectamente todos los caracteres (44).

La agudeza visual se valoró con la notación logMAR; esta se muestra en los optotipos para la última fila en la que el participante reconoce correctamente los 5 caracteres. Si identificaba alguna letra más de la siguiente fila, se restaba 0,02 unidades logarítmica al valor total obtenido (44, 46, 49).

Se midió la agudeza visual fotópica para diferentes niveles de contraste de optotipo (100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%) sin y con la interposición a los participantes en formato de gafa, de los filtros neutros de diferentes densidades ópticas. Además, también se valoró la AV mesópica para el nivel de contraste de optotipo del 100%.

Por otro lado, se valoró la SC bajo los dos niveles de iluminación.

Para valorar la SC se utilizaron los optotipos del test CSV1000E Contrast Chart, a una distancia de 4 metros y binocularmente, siguiendo el procedimiento de examen que se indica en el Manual de instrucciones (137).

El participante debía identificar cuál de los dos estímulos muestra la red sinusoidal en cada nivel de contraste, señalando si ésta se dispone en el círculo de arriba o de abajo. Es decir, es un test con dos elecciones alternativas forzadas. El examinador anota el umbral de percepción de sensibilidad al

contraste para cada frecuencia espacial en la plantilla de recogida de datos (última columna que es capaz de distinguir).

### 5.3.5 Protocolo de evaluación

- 1.- Firma del consentimiento informado
- 2.- Anamnesis
- 3- Adaptación a la oscuridad (15 minutos)
- 4.- Valoración de la AV mesópica de contraste 100%
- 5.- Valoración de la SC mesópica
- 5.- Adaptación a la luz (2 minutos)
- 6.- Valoración de AV fotópica de contraste 100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%
- 7.- Valoración de AV fotópica de contraste 100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25% con la interposición de filtros de densidades neutras (90%,80%,70%)
- 8.- Valoración de la SC fotópica

Todas las medidas se realizaron binocularmente con la compensación óptica habitual del conductor (lentes de contacto, lentes oftálmicas).

El tiempo necesario estimado para la realización de las pruebas fue de aproximadamente 45 minutos por persona.

Antes de comenzar el estudio, todos los participantes tuvieron acceso al “Documento de información al paciente” (anexo 4), que incluía información sobre el carácter voluntario de la participación, el objetivo del estudio, la metodología, los posibles beneficios derivados del estudio y el tratamiento confidencial de los datos personales. Antes de iniciar el protocolo de valoración, el participante debía leer y firmar el “Documento de consentimiento informado” (anexo 5) concediendo así su deseo voluntario a participar en el estudio.

El Comité Ético de Investigación Clínica del Hospital Clínico San Carlos informó favorablemente, el 4 de octubre de 2012, la realización del estudio,



certificando que, tras la valoración de la documentación aportada, no encontraba objeción alguna a su realización (anexo 1).

Una vez que el participante aceptó y firmó el consentimiento para participar en las pruebas, y cumplió los criterios de inclusión, se procedió a completar el formulario de la anamnesis. Durante este periodo de tiempo, se le explicó pormenorizadamente en qué consistían las pruebas que iba a realizar y cuál era su propósito.

Antes de iniciar las pruebas en condiciones mesópicas precedidas de las fotópicas, se pasó a la adaptación a la oscuridad del participante durante 15 minutos, por medio de un antifaz negro, opaco incluso a la luz de un puntero láser rojo (650 nm), de 2 mW de potencia de salida.

Para la valoración de la agudeza visual de lejos: se midió la AVM binocular (100%) y la AVF de lejos de diferentes contrastes (100%, 25%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%) con y sin la interposición de filtros de diferentes densidades neutras (90%, 80%, 70%). Se utilizaron optotipos ETDRS retroiluminados de visión lejana (Precision Vision, La Salle, Ill) que presentaban los diferentes niveles de contraste Weber.

Además, se midió la sensibilidad al contraste en condiciones de iluminación mesópica y fotópica con el Panel CSV 1000 retroiluminado. Test Instrument Viewer. (Good Lite).

Los resultados conseguidos se anotaron en el “Cuaderno de recogida de datos” de cada participante, escrito explícitamente para este estudio (anexo 2).

### 5.3.6 Análisis estadístico

Los datos fueron analizados estadísticamente mediante el software Statgraphics Centurion XVI y SPSS 2.2. Se realizó una estadística descriptiva de las variables evaluadas y se comprobó el supuesto de normalidad usando el test Shapiro-Wilks. Para comparar las AVF para diferentes contrastes, AVM de contraste 100%, SCF y SCM se aplicó el test estadístico t-student para la comparación de medias de variables normales. Adicionalmente se estudió el grado de relación lineal existente entre variables mediante el coeficiente de correlación de Pearson (R), el  $p$ -valor y el coeficiente de correlación intraclase (ICC) para evaluar la consistencia de las medidas. Además, para analizar la correlación entre variables (cuantitativas) se representa en un gráfico tipo Bland-Altman la diferencia de las medias entre la media de las dos medidas (138).

# RESULTADOS

---



## 6 RESULTADOS

A continuación, se exponen los resultados obtenidos para esta Tesis Doctoral. Se presentan con el formato de media y desviación estándar ( $M \pm \delta$ ).

### 6.1 Caracterización de la muestra

La muestra estaba formada por 56 participantes con edades comprendidas entre 20 y 71 años, con una edad media de:  $44,01 \pm 18,42$  años. De los cuales el 37,50% fueron hombres y el 62,50% mujeres.

Se excluyeron un total de 3 personas. Las cuales eran mayores de 50 años y presentaban las siguientes complicaciones visuales: degeneración macular asociada a la edad (DMAE), retinopatía diabética y desprendimiento de retina.

En la siguiente tabla se muestran las características refractivas de los participantes en el estudio (emotropía-55,36%, miopía-28,57% e hipermetropía-16,07%) divididos en función del sexo y de la edad. La edad se ha segmentado en dos grupos, de mayores y menores de 50 años, debido a que en este punto es cuando comienza a empeorar la función visual (50 años). De la muestra total, el 53,57% fueron menores de 50 años y el 46,43% mayores de 50 años.

**Tabla 10. Características demográficas y de estado refractivo de los participantes del estudio.**

Estado Refractivo	EDAD				TOTAL
	20-50 años		51-80 años		
	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres	
Emetropía	3	14	6	8	31
Miopía	2	8	6	0	16
Hipermetropía	0	3	4	2	9
TOTAL	5	25	16	10	56

## RESULTADOS

No hubo ningún participante que recusara a intervenir en el estudio. Ni hubo pérdidas de seguimiento, dado que cada participante realizó todas las pruebas de la función visual, en una sola sesión.

### 6.2 Luminancia de los optotipos, test y sala

Las variaciones máximas en las medidas de luminancia obtenidas con el luxómetro, tanto en los optotipos y test como en los distintos puntos de la sala (luminancia de fondo), fue de  $\pm 10$  cd/m<sup>2</sup> en condiciones fotópicas y de  $\pm 0,1$  cd/m<sup>2</sup> en condiciones mesópicas.

Las capacidades visuales medidas fueron la AV y la SC. En los siguientes epígrafes se describe los valores obtenidos para las diferentes condiciones de iluminación: mesópica y fotópica, así como la relación entre éstas y la influencia de la edad en ambas. Los datos se exponen en tablas y en gráficas para una mejor visualización y comprensión de éstos.

### 6.3 Agudeza visual mesópica

La agudeza visual binocular mesópica se midió para el nivel de contraste de test del 100%, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 11. Valor de agudeza visual binocular mesópica medido con test del 100% contraste Weber.

AV mesópica Escala log MAR	Valor Medio	Valor mín.	Valor máx.
Contraste 100%	$0,01 \pm 0,12$	0,30	-0,15

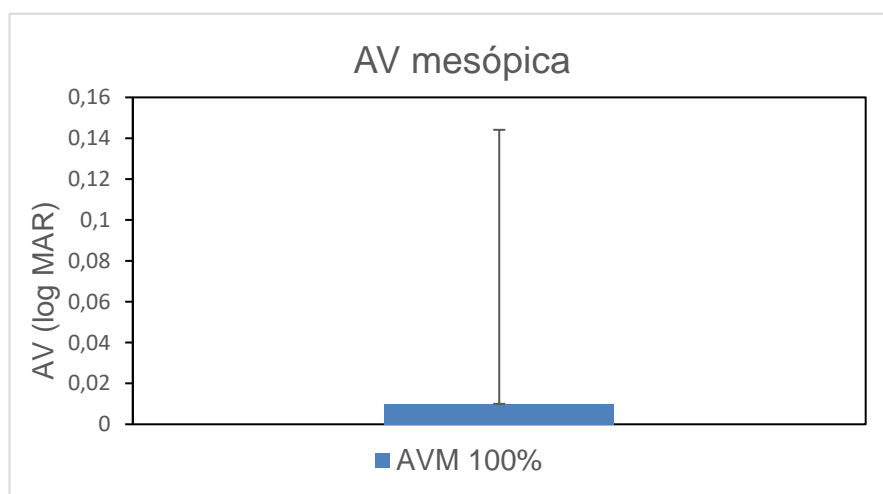


Figura 55. Agudeza visual binocular mesópica de contraste de test 100%.

## 6.4 Agudeza visual fotópica

En el siguiente epígrafe se exponen los datos obtenidos para la AV en condiciones de iluminación fotópica sin y con la interposición de los diferentes filtros (90, 80 y 70%).

### 6.4.1 Agudeza visual fotópica sin filtro y con filtros

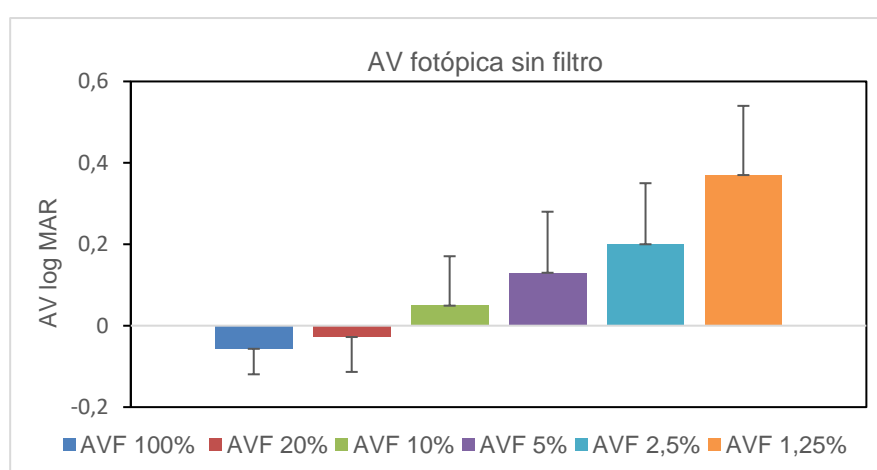


Figura 56. Agudeza visual binocular fotópica sin filtro de contraste de test: 100%, 20%, 10%, 5%, 2.5% y 1.25%.

RESULTADOS

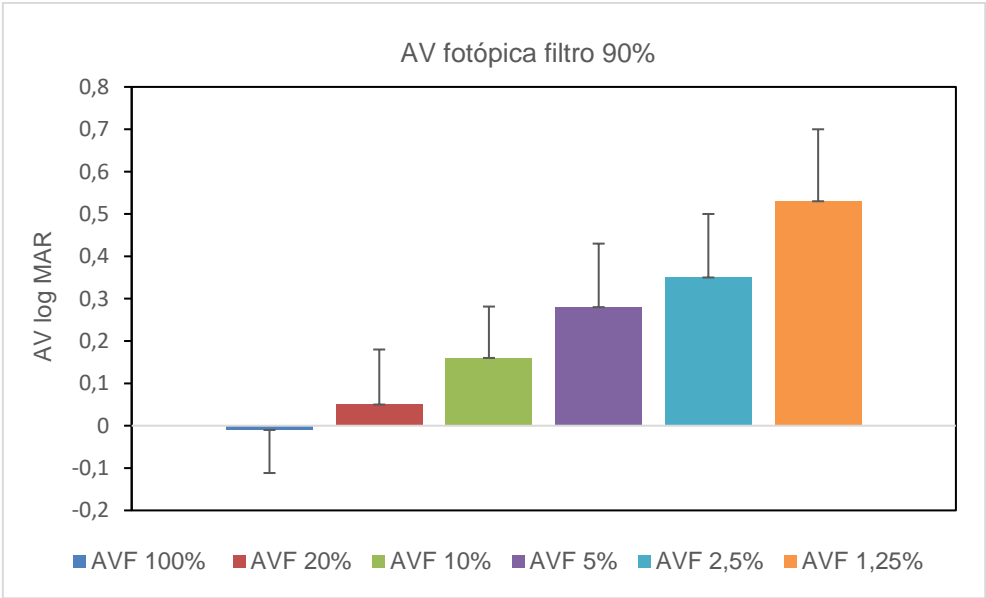


Figura 57. Agudeza visual binocular fotópica con filtro del 90% de contraste de test: 100%, 20%, 10%, 5%, 2.5% y 1.25%.

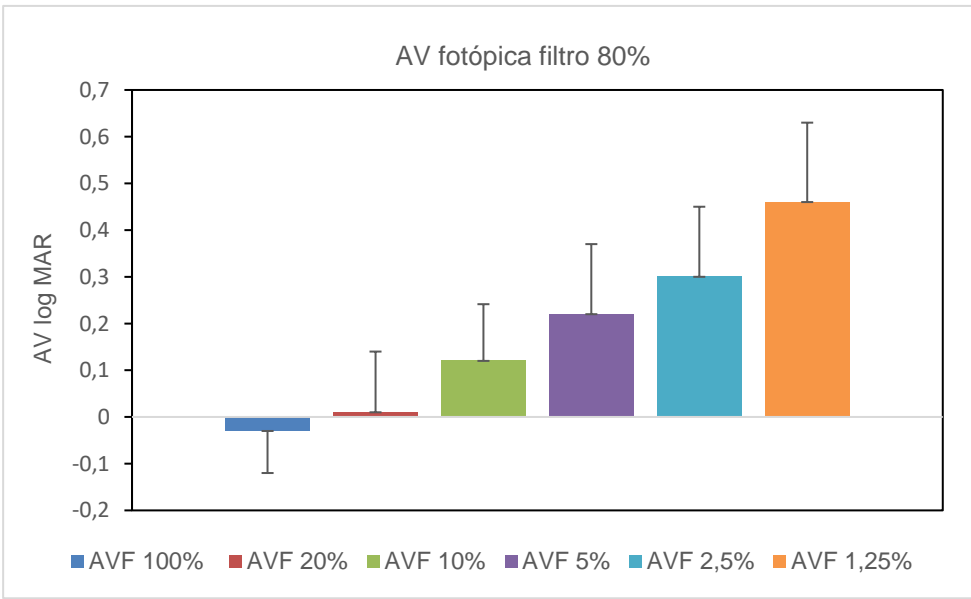
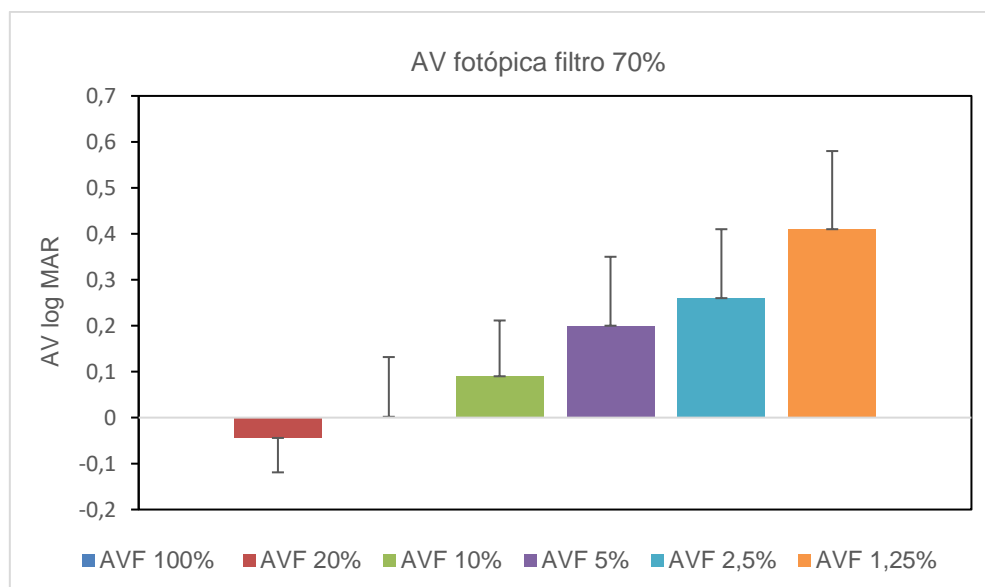


Figura 58. Agudeza visual binocular fotópica con filtro del 80% de contraste de test: 100%, 20%, 10%, 5%, 2.5% y 1.25%.





**Figura 59. Agudeza visual binocular fotópica con filtro del 70% de contraste de test: 100%, 20%, 10%, 5%, 2.5% y 1.25%.**

En la tabla siguiente se muestra, la disminución de la AV fotópica logMAR al disminuir el contraste de los optotipos (filas). De igual forma, el comportamiento del sistema visual en la resolución espacial es menor al disminuir la iluminación retiniana por la interposición de filtros de diferentes absorbancias (columnas).

**Tabla 12. Valores de agudeza visual binocular fotópica logMAR sin filtro y con filtros de 90%, 80% y 70% medidas con test de diferente contraste Weber (100%, 20%, 10%, 5%, 2.5% y 1.25%).**

AV fotópica - Escala logMAR	sin filtro	filtro 90%	filtro 80%	filtro 70%
Contraste 100%	-0,06 ± 0,06	-0,01 ± 0,10	-0,03 ± 0,09	-0,04 ± 0,07
Contraste 20%	-0,03 ± 0,08	0,05 ± 0,13	0,01 ± 0,11	0,00 ± 0,10
Contraste 10%	0,04 ± 0,12	0,16 ± 0,13	0,12 ± 0,13	0,09 ± 0,13
Contraste 5%	0,13 ± 0,15	0,28 ± 0,15	0,22 ± 0,15	0,20 ± 0,15
Contraste 2,5%	0,20 ± 0,15	0,35 ± 0,15	0,30 ± 0,17	0,26 ± 0,16
Contraste 1,25%	0,37 ± 0,17	0,53 ± 0,17	0,46 ± 0,17	0,41 ± 0,17

## RESULTADOS

A continuación, se muestra la misma tabla anterior para los máximos y los mínimos obtenidos.

**Tabla 13. Valores máximos y mínimos de agudeza visual binocular fotópica sin filtro y con filtros de 90%, 80% y 70% medidas con test de diferente contraste Weber (100%, 20%, 10%, 5%, 2.5% y 1.25%).**

AV fotópica - Escala logMAR		sin filtro	filtro 90%	filtro 80%	filtro 70%
Contraste					
100%	Máx	-0,12	-0,12	-0,10	-0,10
	Mín	0,16	0,28	0,24	0,22
20%	Máx	-0,10	-0,09	-0,09	-0,09
	Mín	0,28	0,40	0,32	0,30
10%	Máx	-0,09	-0,04	-0,08	-0,08
	Mín	0,34	0,58	0,44	0,46
5%	Máx	-0,09	0,04	0,02	-0,06
	Mín	0,52	0,70	0,64	0,64
2,5%	Máx	-0,08	0,08	0,08	0,04
	Mín	0,62	0,81	0,80	0,74
1,25%	Máx	-0,03	0,30	0,26	0,06
	Mín	0,84	1,10	1,00	0,92

## 6.5 Influencia de la edad en la agudeza visual

Respecto a la influencia de la edad en la AV, para todas las condiciones de iluminación (fotópica y mesópica), diferentes contrastes de optotipo y distintos filtros (90%, 80% y 70%) se observaron valores significativamente menores de AV (logMAR) en los participantes más jóvenes (menores de 50 años), en comparación con el grupo de mayor edad (mayores de 50 años). A continuación, se exponen los valores de AV mesópica y fotópica para los contrastes evaluados en ambos grupos de conductores.

### 6.5.1 Agudeza visual mesópica

En la siguiente tabla se muestran los valores de AV mesópica para contraste 100% Weber, segmentándolos por edad. En ella se puede apreciar una clara diferencia significativa obteniéndose mejor AV (menores valores logMAR) para los menores de 50 años. El  $p$ -valor = 0,0001 indica las diferencias estadísticamente significativas entre los dos grupos de edad.

**Tabla 14. Valores de agudeza visual binocular mesópica con un test de contraste 100% Weber, para el total de la muestra y en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y  $p$ -valor.**

<b>AV mesópica 100%</b>	<b>TOTAL (n=56)</b>	<b>Menor de 50 años (n=30)</b>	<b>Mayor de 50 años (n=26)</b>	<b>Diferencias &lt;50 - &gt;50</b>	<b><math>p</math>-valor</b>
Escala logMAR	0,01 ± 0,12	-0,06 ± 0,06	0,09 ± 0,12	-0,15 ± 0,09	0,0001

## RESULTADOS

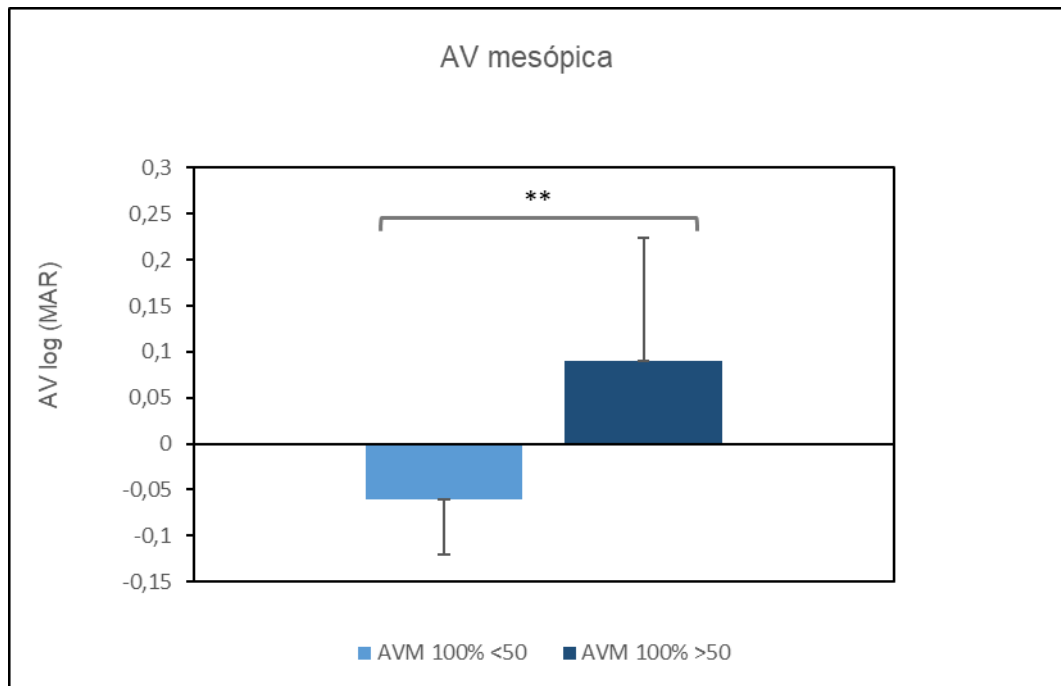


Figura 60. Agudeza visual binocular mesópica al 100% de contraste de test para menores y mayores de 50 años.

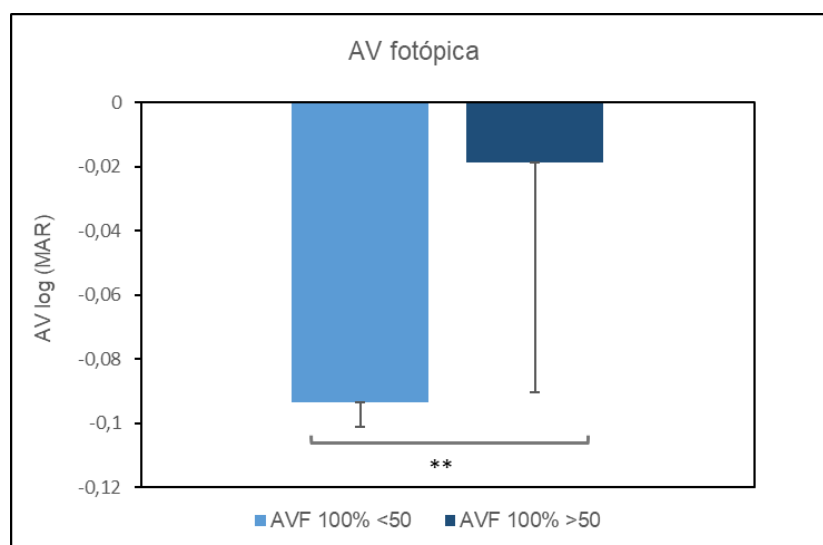
### 6.5.2 Agudeza visual fotópica

En este subapartado se exponen los datos y las gráficas de los valores referentes a la agudeza visual fotópica para los 6 contrastes estudiados (100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%) en los dos grupos de edad establecidos. Además, en 4 gráficas y 4 tablas se resumen las respuestas de AV binocular fotópica, sin filtro, con filtro de 90%, con filtro de 80% y con filtro de 70% y la influencia de la edad.

Como se puede valorar, las diferencias son importantes para los diferentes contrastes de optotipos. Existen también diferencias entre los grupos de edad, manifestando una tendencia muy semejante en todas las condiciones de evaluación.

**Tabla 15. Valores de agudeza visual binocular fotópica con un test de contraste 100% Weber, para el total de la muestra y en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y *p*-valor.**

<b>AV fotópica 100%</b>	<b>TOTAL (n=56)</b>	<b>Menor de 50 años (n=30)</b>	<b>Mayor de 50 años (n= 26)</b>	<b>Diferencias &lt;50 - &gt;50</b>	<b><i>p</i>-valor</b>
Escala logMAR	-0,06 ± 0,06	-0,09 ± 0,01	-0,02 ± 0,07	-0,07 ± 0,04	0,0001



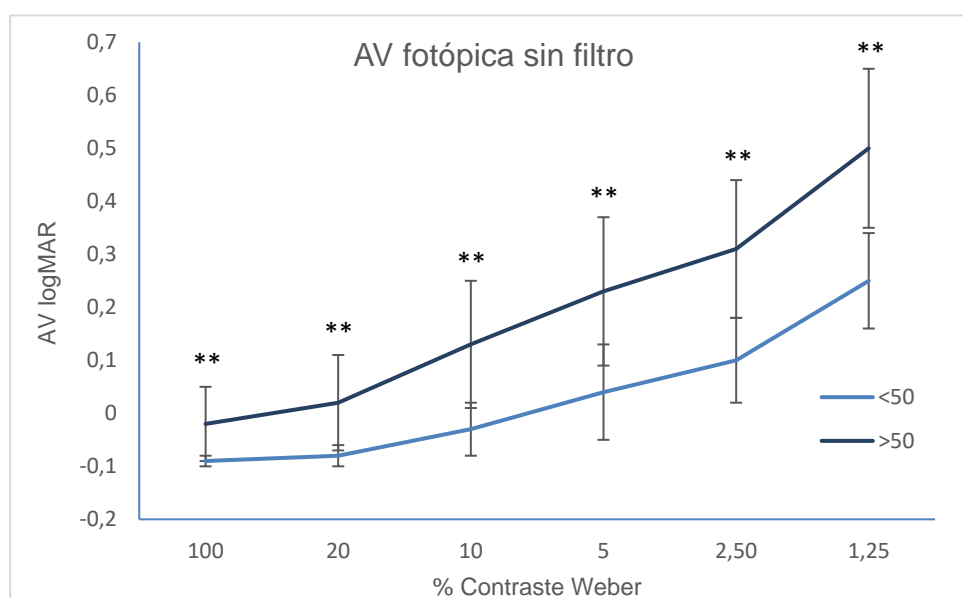
**Figura 61. Agudeza visual binocular fotópica al 100% de contraste de test para menores y mayores de 50 años.**

En las siguientes tablas se presentan los valores de AV fotópica, para los 6 contrastes Weber estudiados y para las 4 condiciones de iluminación establecidas: sin filtro, con filtro de 90%, con filtro de 80% y con filtro de 70%, respectivamente. Además, los resultados se distribuyen en los 2 rangos de edad establecidos (mayores y menores de 50 años) y se indican también el *p*-valor (0,0001), resultando diferencias estadísticamente significativas para todos los casos.

## RESULTADOS

**Tabla 16. Valores de agudeza visual binocular fotópica sin filtro con test de contraste 100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25% Weber, para el total de la muestra y en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y *p*-valor.**

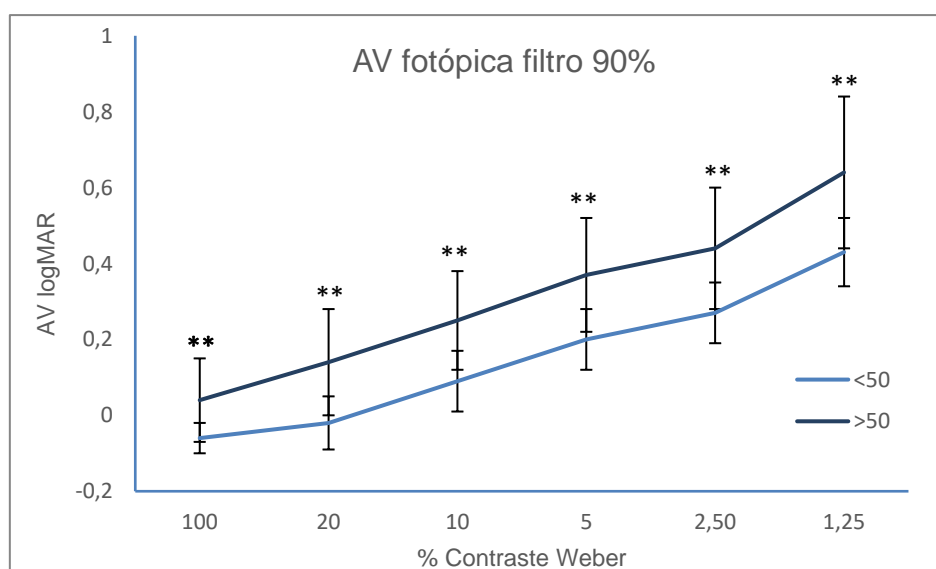
AV fotópica sin filtro (escala log MAR)	TOTAL (n=56)	Menor de 50 años (n=30)	Mayor de 50 años (n=26)	Diferencias <50 - >50	<i>p</i> -valor
Contraste 100%	-0,06 ± 0,06	-0,09 ± 0,01	-0,02 ± 0,07	-0,07 ± 0,05	0,0001
Contraste 20%	-0,03 ± 0,08	-0,08 ± 0,02	0,02 ± 0,09	-0,10 ± 0,07	0,0001
Contraste 10%	0,04 ± 0,11	-0,03 ± 0,05	0,13 ± 0,12	-0,15 ± 0,09	0,0001
Contraste 5%	0,13 ± 0,15	0,04 ± 0,09	0,23 ± 0,14	-0,18 ± 0,12	0,0001
Contraste 2,5%	0,20 ± 0,15	0,10 ± 0,08	0,31 ± 0,13	-0,21 ± 0,11	0,0001
Contraste 1,25%	0,37 ± 0,12	0,25 ± 0,09	0,50 ± 0,15	-0,25 ± 0,12	0,0001



**Figura 62. Agudeza visual binocular fotópica con diferentes contrastes de optotipo (100%,20%,10%,5%,2,5% y 1,25%) en menores y mayores de 50 años.**

**Tabla 17. Valores de agudeza visual binocular fotópica con filtro del 90%, con test de contraste 100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25% Weber, para el total de la muestra y en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y *p*-valor.**

AVF filtro 90% (escala log MAR)	TOTAL (n=56)	Menor de 50 años (n=30)	Mayor de 50 años (n=26)	Diferencias <50 - >50	<i>p</i> -valor
Contraste 100%	-0,01 ± 0,10	-0,06 ± 0,04	0,04 ± 0,11	-0,11 ± 0,08	0,0001
Contraste 20%	0,05 ± 0,13	-0,02 ± 0,07	0,14 ± 0,14	-0,16 ± 0,11	0,0001
Contraste 10%	0,16 ± 0,13	0,09 ± 0,08	0,25 ± 0,13	-0,17 ± 0,11	0,0001
Contraste 5%	0,28 ± 0,15	0,20 ± 0,08	0,37 ± 0,15	-0,17 ± 0,12	0,0001
Contraste 2,5%	0,35 ± 0,15	0,27 ± 0,08	0,44 ± 0,16	-0,18 ± 0,12	0,0001
Contraste 1,25%	0,53 ± 0,17	0,43 ± 0,09	0,64 ± 0,20	-0,20 ± 0,13	0,0001

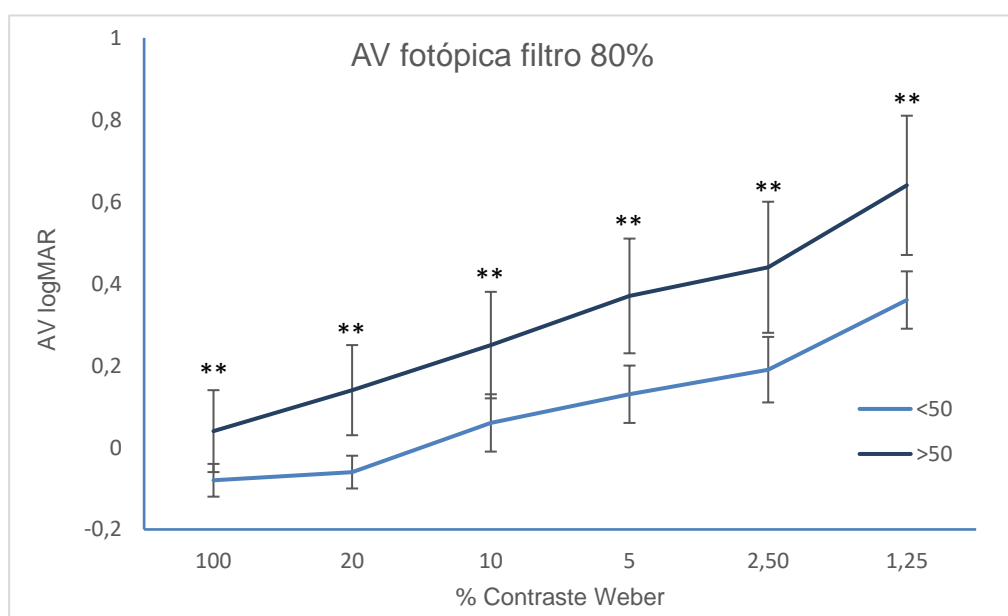


**Figura 63. Agudeza visual binocular fotópica con filtro de 90% y diferentes contrastes de optotipo (100%,20%,10%,5%,2,5% y 1,25%) en menores y mayores de 50 años.**

## RESULTADOS

**Tabla 18. Valores de agudeza visual binocular fotópica con filtro del 80%, con test de contraste 100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25% Weber, para el total de la muestra y en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y *p*-valor.**

AVF filtro 80% (escala log MAR)	TOTAL (n=56)	Menor de 50 años (n=30)	Mayor de 50 años (n=26)	Diferencias <50 - >50	<i>p</i> -valor
Contraste 100%	-0,03 ± 0,08	-0,08 ± 0,04	0,01 ± 0,10	-0,09 ± 0,07	0,0001
Contraste 20%	0,01 ± 0,11	-0,06 ± 0,04	0,08 ± 0,11	-0,14 ± 0,08	0,0001
Contraste 10%	0,12 ± 0,13	0,06 ± 0,07	0,20 ± 0,13	-0,14 ± 0,10	0,0001
Contraste 5%	0,22 ± 0,15	0,13 ± 0,07	0,33 ± 0,14	-0,20 ± 0,11	0,0001
Contraste 2,5%	0,29 ± 0,16	0,19 ± 0,08	0,41 ± 0,16	-0,22 ± 0,13	0,0001
Contraste 1,25%	0,46 ± 0,17	0,36 ± 0,07	0,58 ± 0,17	-0,23 ± 0,12	0,0001

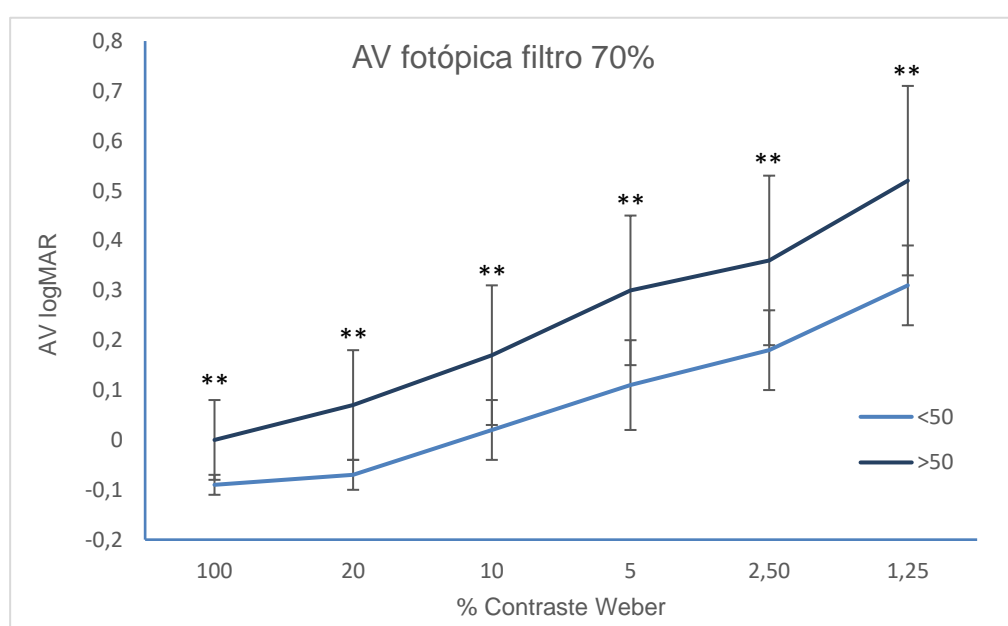


**Figura 64. Agudeza visual binocular fotópica con filtro de 80% y diferentes contrastes de optotipo (100%,20%,10%,5%,2,5% y 1,25%) en menores y mayores de 50 años.**



**Tabla 19. Valores de agudeza visual binocular fotópica con filtro del 70%, con test de contraste 100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25% Weber, para el total de la muestra y en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y *p*-valor.**

AVF filtro 70% (escala log MAR)	TOTAL (n=56)	Menor de 50 años (n=30)	Mayor de 50 años (n=26)	Diferencias <50 - >50	<i>p</i> -valor
Contraste 100%	-0,04 ± 0,07	-0,09 ± 0,02	0,00 ± 0,08	-0,09 ± 0,06	0,0001
Contraste 20%	0,00 ± 0,10	-0,07 ± 0,03	0,07 ± 0,11	-0,13 ± 0,08	0,0001
Contraste 10%	0,09 ± 0,13	0,02 ± 0,06	0,17 ± 0,14	-0,15 ± 0,11	0,0001
Contraste 5%	0,20 ± 0,15	0,11 ± 0,09	0,30 ± 0,15	-0,19 ± 0,12	0,0001
Contraste 2,5%	0,26 ± 0,16	0,18 ± 0,08	0,36 ± 0,17	-0,19 ± 0,13	0,0001
Contraste 1,25%	0,41 ± 0,17	0,31 ± 0,08	0,52 ± 0,19	-0,20 ± 0,14	0,0001



**Figura 65. Agudeza visual binocular fotópica con filtro de 70% y diferentes contrastes de optotipo (100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%) en menores y mayores de 50 años.**

## 6.6 Relación entre la agudeza visual mesópica y fotópica

### 6.6.1 Concordancia agudeza visual mesópica y fotópica de máximo contraste (100%)

Los resultados mostraron una disminución estadísticamente significativa de la AV mesópica de contraste máximo en comparación con la AV fotópica de contraste máximo, tal como se muestra en la siguiente tabla y figura:

**Tabla 20. Relación de la Agudeza visual fotópica y mesópica de máximo contraste (100%) para el total de la muestra y según la edad (menores y mayores de 50 años).**

	AV fotópica 100%	AV mesópica 100%	<i>p</i> -valor
Menores de 50 años	-0,09 ± 0,01	-0,06 ± 0,06	0,0001
Mayores de 50 años	-0,02 ± 0,07	0,09 ± 0,12	0,0001
TOTAL	-0,06 ± 0,05	0,01 ± 0,11	0,0001

Esta disminución estadísticamente significativa de agudeza visual, también se puede observar para la segmentación de grupos: en menores y en mayores de 50 años.

## 6.7 Predictor fotópico de la agudeza visual mesópica de contraste 100% para el total de la muestra

De la combinación de las variables (contraste de optotipos y filtros) se propone la simulación de condiciones de iluminación mesópicas, situándose el individuo en condiciones fotópicas. Se trata de conocer la combinación de contraste y filtro que simule mejor el valor de AV mesópica logMAR medida en condiciones fotópicas.

Se realizó una comparativa entre los valores de AV de contraste 100% en iluminación mesópica y los valores de AV fotópica de contraste desde 100% al 1,25% sin y con la interposición de filtros (90%, 80% y 70%) con el fin de encontrar un predictor de la AV mesópica de 100%.

Para ello se estudió la diferencia de cada una de las agudezas visuales fotópicas y la agudeza visual mesópica de 100%:  $dif = F_x AV_y - MAV_{100\%}$ ; siendo x: sin filtro, 90%, 80% o 70%, e y: 100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25% contraste Weber.

En las siguientes tablas se muestran las diferencias, para todas las variables.

**Tabla 21. Diferencia entre AV fotópica sin filtro y AV mesópica del 100%-sin filtro.**

AV fotópica sin filtro- AV mesópica <sub>100%</sub>	
Contraste 100%	-0,07 ± 0,08
Contraste 20%	-0,04 ± 0,07
Contraste 10%	0,03 ± 0,06
Contraste 5%	0,12 ± 0,08
Contraste 2,5%	0,19 ± 0,08
Contraste 1,25%	0,36 ± 0,10

## RESULTADOS

Tabla 22. Diferencia entre AV fotópica con filtro 90% y AV mesópica del 100%-sin filtro.

AV fotópica con filtro 90% - AV mesópica <sub>100%</sub>	
Contraste 100%	-0,03 ± 0,06
Contraste 20%	0,04 ± 0,06
Contraste 10%	0,15 ± 0,07
Contraste 5%	0,27 ± 0,08
Contraste 2,5%	0,34 ± 0,08
Contraste 1,25%	0,51 ± 0,10

Tabla 23. Diferencia entre AV fotópica con filtro 80% y AV mesópica del 100%-sin filtro.

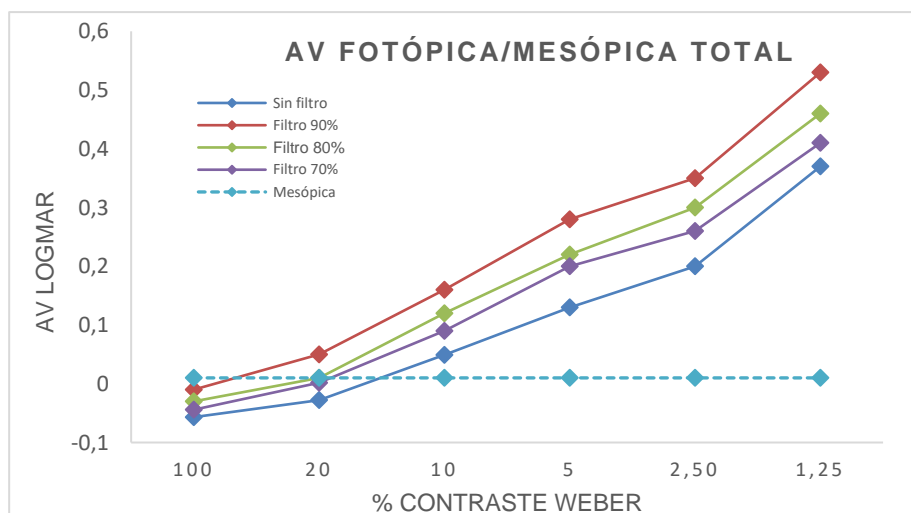
AV fotópica con filtro <b>80%</b> - AV mesópica <sub>100%</sub>	
Contraste 100%	-0,05 ± 0,07
<b>Contraste 20%</b>	<b>-0,00 ± 0,06</b>
Contraste 10%	0,11 ± 0,08
Contraste 5%	0,21 ± 0,08
Contraste 2,5%	0,29 ± 0,09
Contraste 1,25%	0,45 ± 0,09

Tabla 24. Diferencia entre AV fotópica con filtro 70% y AV mesópica del 100%-sin filtro.

AV fotópica con filtro 70% - AV mesópica <sub>100%</sub>	
Contraste 100%	-0,06 ± 0,07
Contraste 20%	-0,02 ± 0,06
Contraste 10%	0,08 ± 0,07
Contraste 5%	0,18 ± 0,08
Contraste 2,5%	0,25 ± 0,08
Contraste 1,25%	0,40 ± 0,11

Los valores de AV fotópica, que mejor se relacionan con la AV mesópica de contraste 100% son los que dan lugar a una diferencia más cercana a 0 en valor absoluto. Como se puede observar en la siguiente figura es **el filtro de 80% con un contraste del 20%** el que más se aproxima, siendo la diferencia de 0.

Como se ilustra a continuación, el punto de corte con la línea discontinua azul (agudeza visual mesópica), corresponde a la línea verde (agudeza visual fotópica con filtro del 80% y contraste de optotipo del 20%).



**Figura 66. Agudeza visual mesópica 100%-sin filtro y fotópica sin y con filtros (90%, 80% y 70%) para los diferentes contrastes de optotipo (100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%) para el total de la muestra.**

Por la importancia de los resultados, se expone a continuación una gráfica donde se representa la línea de corte de la AV mesópica del 100% con las AV fotópicas valorados con contraste del 100%, 20% y 10% y sin y con la interposición de los 3 filtros (90%, 80% y 70%).

## RESULTADOS

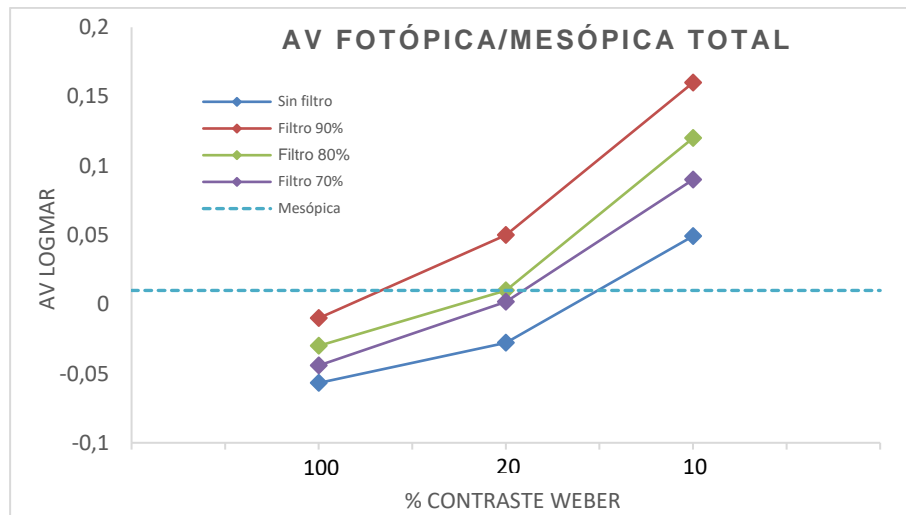


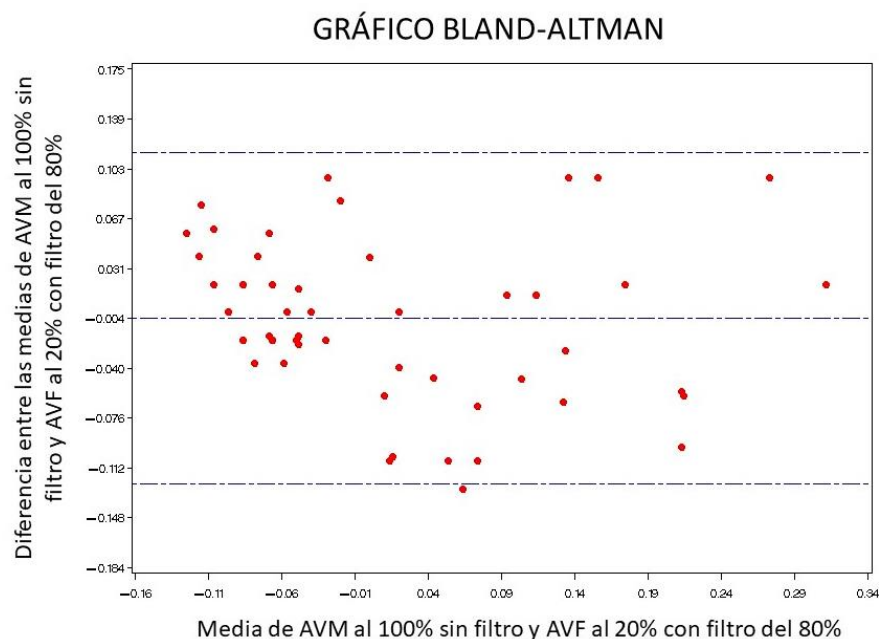
Figura 67. Agudeza visual mesópica 100%-sin filtro y fotópica sin y con filtros (90%, 80% y 70%) para los contrastes de optotipo (100%, 20% y 10%) para el total de la muestra.

### 6.7.1 Agudeza visual fotópica con filtro de 80% y test de contraste Weber de 20%

Para este caso se estudia el coeficiente de correlación de Pearson (R), el  $p$ -valor y el coeficiente de correlación intraclass (ICC) para evaluar la consistencia de las medidas. Además, para analizar cómo se relacionan estas variables (cuantitativas) se representa en un gráfico tipo Bland-Altman la diferencia de las medias entre la media de las dos medidas.

Tabla 25. Relación entre AV mesópica al 100 % y AV fotópica con filtro 80%: media de AV mesópica al 100%-sin filtro, media de AV fotópica de contraste del 20% con filtro 80%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R),  $p$ -valor y coeficiente de correlación intraclass (ICC).

AV Mesópica 100%	AV Fotópica 20%-filtro 80%	Diferencia (AVF-AVM)	R	$p$ -valor	ICC
0,01 ± 0,12	0,01 ± 0,11	-0,00 ± 0,06	0,86	0,0001	0,86



**Figura 68. Gráfico Bland-Altman, relación AV mesópica al 100%-sin filtro y AV fotópica al 20% con filtro del 80%.**

Ambos valores están estrechamente relacionados, debido a que presentan un índice de correlación intraclase elevado (próximo a 1) y un gráfico de Bland-Altman óptimo (los puntos mantienen una distribución homogénea, permaneciendo dentro de los límites de las medias).

Los datos anteriores hacen referencia al total de la muestra. Además, se han realizado los mismos cálculos, tablas y gráficas dividiendo la muestra en mayores y menores de 50 años.

## RESULTADOS

### 6.8 Predictor fotópico de la agudeza visual mesópica de contraste 100% para menores de 50 años

A continuación, se presentan los resultados para el grupo de menores de 50 años. En las siguientes tablas se muestran las diferencias, para todas las variables, de la misma manera que se realizó en el epígrafe anterior para el total de la muestra.

Tabla 26. Diferencia entre AV fotópica sin filtro y AV mesópica del 100%-sin filtro para menores de 50 años.

AV fotópica sin filtro- AV mesópica <sub>100%</sub>	
Contraste 100%	-0,04 ± 0,05
Contraste 20%	-0,02 ± 0,05
Contraste 10%	0,02 ± 0,04
Contraste 5%	0,10 ± 0,07
Contraste 2,5%	0,16 ± 0,07
Contraste 1,25%	0,31 ± 0,01

Tabla 27. Diferencia entre AV fotópica con filtro 90% y AV mesópica del 100%-sin filtro para menores de 50 años.

AV fotópica con filtro 90% - AV mesópica <sub>100%</sub>	
<b>Contraste 100%</b>	<b>-0,00 ± 0,04</b>
Contraste 20%	0,04 ± 0,06
Contraste 10%	0,14 ± 0,06
Contraste 5%	0,26 ± 0,06
Contraste 2,5%	0,32 ± 0,07
Contraste 1,25%	0,49 ± 0,08



Tabla 28. Diferencia entre AV fotópica con filtro 80% y AV mesópica del 100%-sin filtro para menores de 50 años.

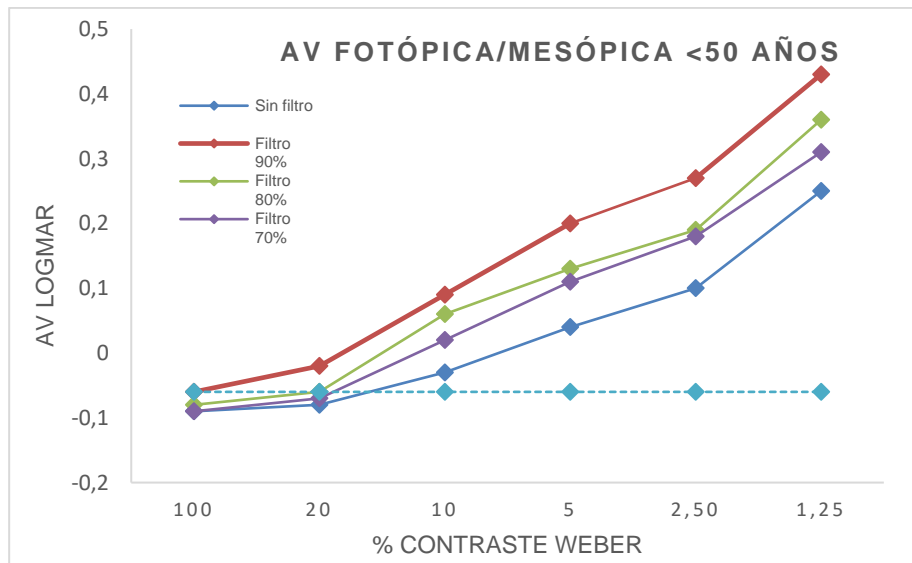
AV fotópica con filtro <b>80%</b> - AV mesópica <sub>100%</sub>	
Contraste 100%	-0,03 ± 0,04
<b>Contraste 20%</b>	<b>0,00 ± 0,05</b>
Contraste 10%	0,11 ± 0,07
Contraste 5%	0,19 ± 0,07
Contraste 2,5%	0,25 ± 0,05
Contraste 1,25%	0,41 ± 0,05

Tabla 29. Diferencia entre AV fotópica con filtro 70% y AV mesópica del 100%-sin filtro para menores de 50 años.

AV fotópica con filtro <b>70%</b> - AV mesópica <sub>100%</sub>	
Contraste 100%	-0,03 ± 0,05
Contraste 20%	-0,01 ± 0,04
Contraste 10%	0,08 ± 0,05
Contraste 5%	0,17 ± 0,07
Contraste 2,5%	0,23 ± 0,05
Contraste 1,25%	0,37 ± 0,06

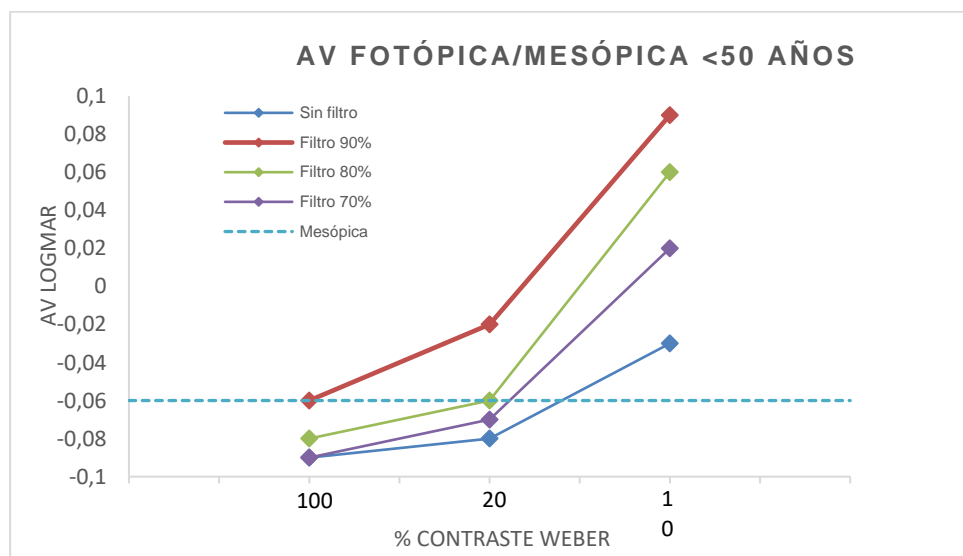
Las AV más semejantes en promedio a la AV mesópica del 100% para el grupo de menores de 50 años son (como se muestran en la siguiente figura): AV de **contraste 100% con filtro de 90%** y AV de **contraste 20% con filtro de 80%**.

## RESULTADOS



**Figura 69. Agudeza visual mesópica 100%-sin filtros y fotópica sin y con filtros (90%, 80% y 70%) para los diferentes contrastes de optotipo (100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%) para menores de 50 años.**

Al igual que para el total de la muestra, a continuación, se muestra en detalle los puntos de corte de la agudeza visual mesópica con la agudeza visual fotópica para menores de 50 años.



**Figura 70. Agudeza visual mesópica 100%-sin filtros y fotópica sin y con filtros (90%, 80% y 70%) para los contrastes de optotipo (100%, 20% y 10%) para menores de 50 años.**

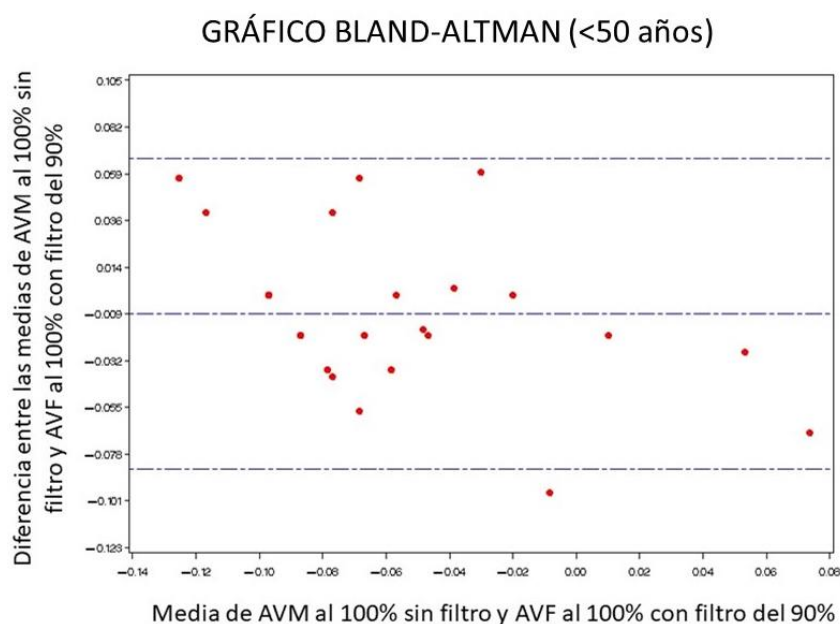
Para cada una de ellas se estudia el coeficiente de correlación de Pearson (R), el  $p$ -valor y el coeficiente de correlación intraclase (ICC) para evaluar la consistencia de las medidas. Además, para analizar cómo se relacionan estas variables (cuantitativas) se representa en un gráfico tipo Bland-Altman la diferencia de las medias entre la media de las dos medidas.

### 6.8.1 Agudeza visual fotópica con filtro de 90% y test de contraste Weber de 100% en menores de 50 años

De igual forma que en el apartado anterior y siguiendo la misma metodología, se analiza el comportamiento de la AV fotópica de los menores de 50 años con filtro del 90% y optotipos de contraste 100%

**Tabla 30. Relación entre AV mesópica al 100%-sin filtros y AV fotópica con filtro de 90%: media de AV mesópica al 100%, media de AV fotópica 100% con filtro 90%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R),  $p$ -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para menores de 50 años.**

AV Mesópica 100%	AV Fotópica 100%-filtro 90%	Diferencia (AVF-AVM)	R	$p$ -valor	ICC
-0,06 $\pm$ 0,06	-0,06 $\pm$ 0,04	0,00 $\pm$ 0,04	0,75	0,0001	0,70



**Figura 71. Gráfico Bland-Altman, relación AV mesópica al 100%-sin filtros y AV fotópica al 100% con filtro del 90% en menores de 50 años.**

## RESULTADOS

### 6.8.2 Agudeza visual fotópica con filtro de 80% y test de contraste Weber de 20% en menores de 50 años

En el caso de menores de 50 años, el mejor predictor de los anteriormente estudiados, con un ICC más elevado (0,70) es el de filtro de 90% y contraste de 100%. El filtro del 80% con contraste 20% la diferencia es 0, pero tiene un coeficiente de correlación de Pearson e ICC bajos.

Tabla 31. Relación entre AV mesópica al 100%-sin filtros y AV fotópica con filtro 80%: media de AV mesópica al 100%, media de AV fotópica 20% con filtro 80%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), *p*-valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para menores de 50 años.

AV Mesópica 100%	AV Fotópica 20%-filtro 80%	Diferencia (AVF-AVM)	R	<i>p</i> -valor	ICC
-0,06 ± 0,06	-0,06 ± 0,04	0,00 ± 0,05	0,52	0,0001	0,50

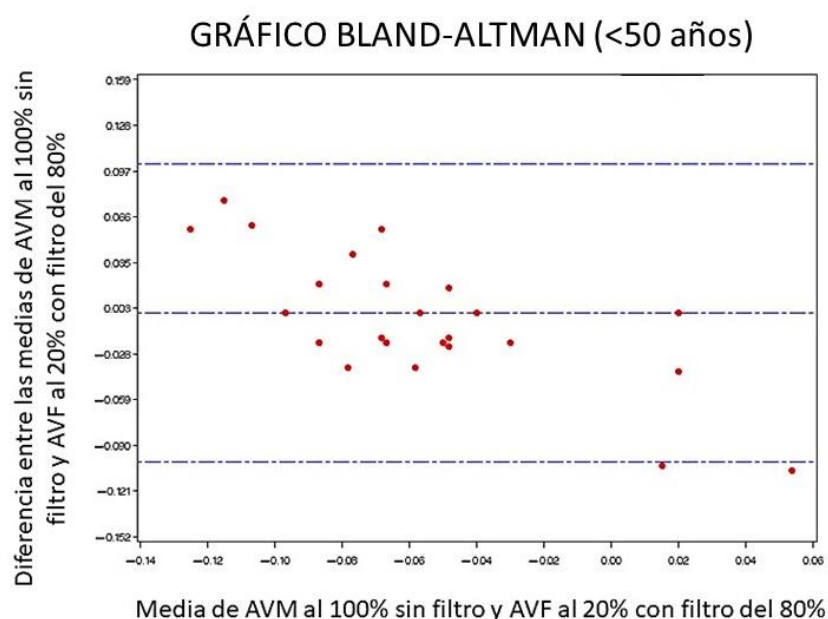


Figura 72. Gráfico Bland-Altman, relación AV mesópica al 100%-sin filtros y AV fotópica al 20% con filtro del 80% en menores de 50 años.

## 6.9 Predictor fotópico de la agudeza visual mesópica de contraste 100% para mayores de 50 años

A continuación, se presentan los resultados para el grupo de mayores de 50 años. En las siguientes tablas se muestran las diferencias, para todas las variables, de la misma manera que se realizó en el epígrafe anterior para menores de 50 años.

**Tabla 32. Diferencia entre AV fotópica sin filtro y AV mesópica del 100%-sin filtros para mayores de 50 años.**

AV fotópica sin filtro- AV mesópica <sub>100%</sub>	
Contraste 100%	-0,12 ± 0,07
Contraste 20%	-0,07 ± 0,07
Contraste 10%	0,03 ± 0,07
Contraste 5%	0,14 ± 0,08
Contraste 2,5%	0,22 ± 0,08
Contraste 1,25%	0,41 ± 0,10

**Tabla 33. Diferencia entre AV fotópica con filtro 90% y AV mesópica del 100%-sin filtros para mayores de 50 años.**

AV fotópica con filtro 90% - AV mesópica <sub>100%</sub>	
Contraste 100%	-0,05 ± 0,07
Contraste 20%	0,04 ± 0,07
Contraste 10%	0,16 ± 0,08
Contraste 5%	0,28 ± 0,09
Contraste 2,5%	0,35 ± 0,09
Contraste 1,25%	0,54 ± 0,12

## RESULTADOS

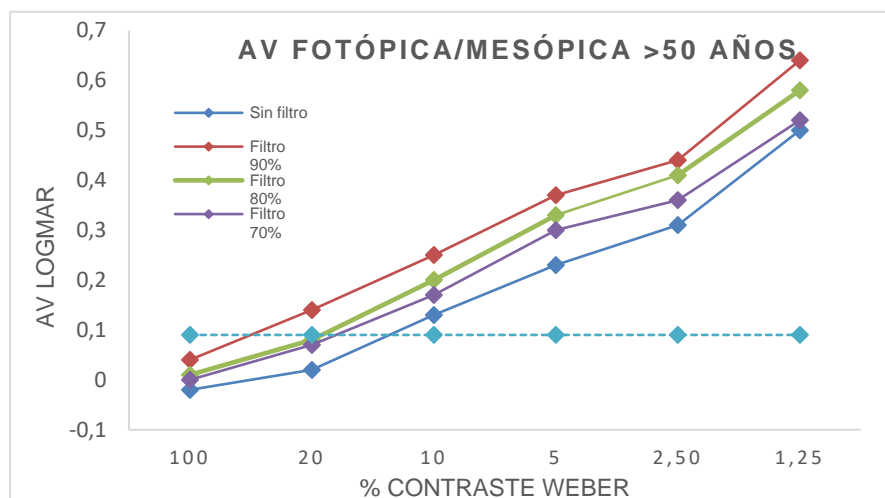
Tabla 34. Diferencia entre AV fotópica con filtro 80% y AV mesópica del 100%-sin filtros para mayores de 50 años.

AV fotópica con filtro 80% - AV mesópica <sub>100%</sub>	
Contraste 100%	-0,08 ± 0,08
Contraste <b>20%</b>	<b>-0,01 ± 0,07</b>
Contraste 10%	0,10 ± 0,08
Contraste 5%	0,24 ± 0,08
Contraste 2,5%	0,32 ± 0,10
Contraste 1,25%	0,49 ± 0,11

Tabla 35. Diferencia entre AV fotópica con filtro 70% y AV mesópica del 100%-sin filtros para mayores de 50 años.

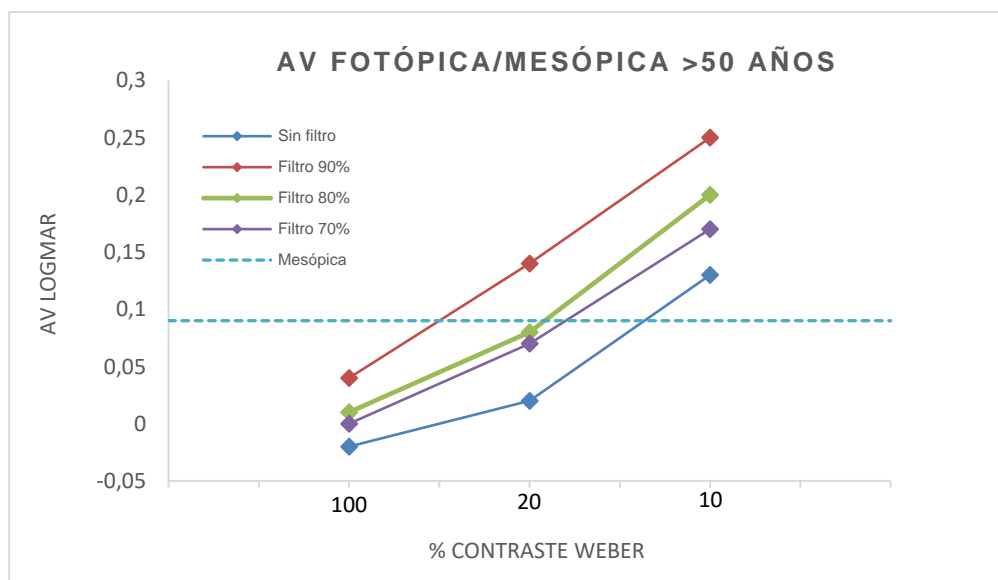
AV fotópica con filtro 70% - AV mesópica <sub>100%</sub>	
Contraste 100%	-0,09 ± 0,07
Contraste 20%	-0,03 ± 0,08
Contraste 10%	0,08 ± 0,09
Contraste 5%	0,21 ± 0,09
Contraste 2,5%	0,27 ± 0,11
Contraste 1,25%	0,43 ± 0,14

Como se puede observar en la siguiente figura, la AV más semejante en promedio a la AV mesópica del 100% para el grupo de mayores de 50 años es la AV de contraste **20% con filtro de 80%**.



**Figura 73. Agudeza visual mesópica 100%-sin filtros y fotópica sin y con filtros (90%, 80% y 70%) para los diferentes contrastes de optotipo (100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%) para mayores de 50 años.**

El mismo procedimiento que anteriormente, a continuación, se muestra en detalle el punto de corte de la agudeza visual mesópica con la agudeza visual fotópica para mayores de 50 años.



**Figura 74. Agudeza visual mesópica 100%-sin filtros y fotópica sin y con filtros (90%,80% y 70%) para los contrastes de optotipo (100%, 20% y 10%) para mayores de 50 años.**

## RESULTADOS

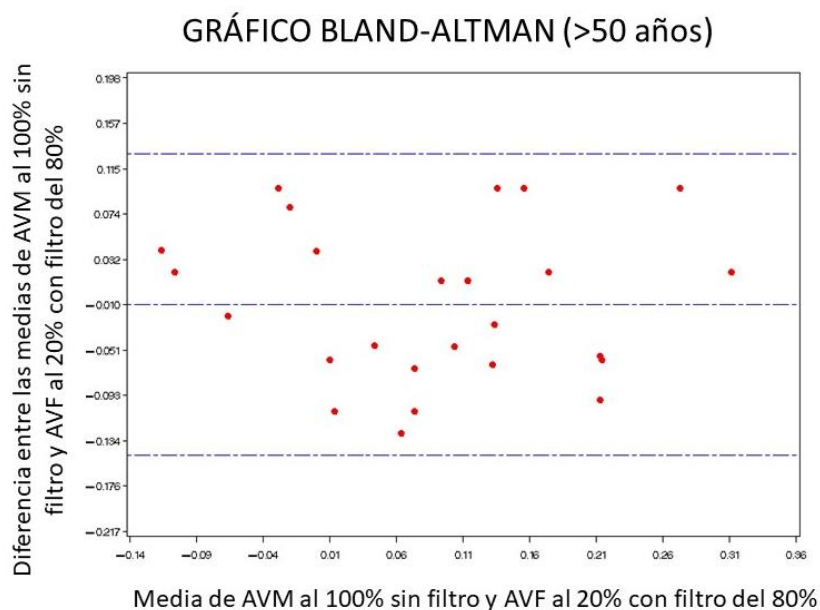
Al igual que las otras variables, se presentan el coeficiente de correlación de Pearson (R), el *p*-valor y el coeficiente de correlación intraclase (ICC) para evaluar la consistencia de las medidas. Además, para analizar la relación entre las variables (cuantitativas) se representa en un gráfico tipo Bland-Altman la diferencia de las medias entre la media de las dos medidas.

### 6.9.1 Agudeza visual con filtro de 80% y test de contraste Weber de 20% en mayores 50 años

Del mismo modo que en los apartados anteriores, se exponen los resultados y el gráfico de Bland-Altman para los conductores mayores de 50 años.

**Tabla 36. Relación entre AV mesópica al 100%-sin filtros y AV fotópica con filtro 80%: media de AV mesópica al 100%, media de AV fotópica 20% con filtro 80%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), *p*-valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para mayores de 50 años.**

AV Mesópica 100%	AV Fotópica 20%-filtro 80%	Diferencia (AVF-AVM)	R	<i>p</i> -valor	ICC
0,09 ± 0,12	0,08 ± 0,11	-0,01 ± 0,07	0,82	0,0001	0,82



**Figura 75. Gráfico Bland-Altman, relación AV mesópica al 100%-sin filtros y AV fotópica al 20% con filtro del 80% en mayores de 50 años.**



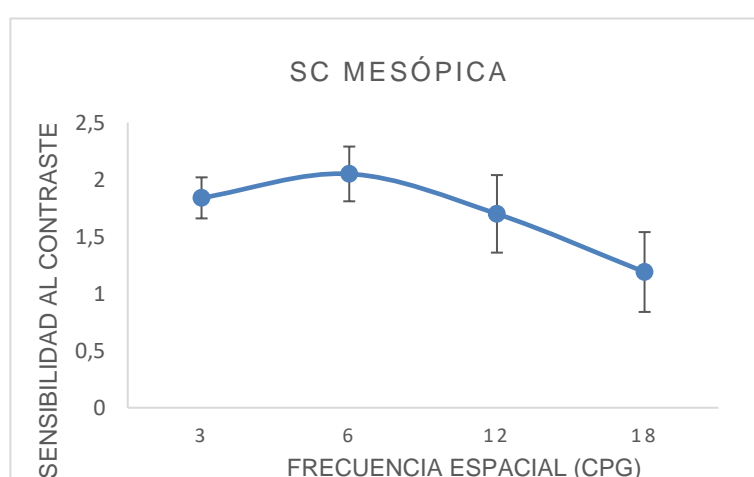
Para el grupo de mayores de 50 años la combinación del contraste del 20% y el filtro de 80% es un buen predictor de la agudeza visual fotópica ya que presenta una diferencia cercana a 0 y un ICC elevado 1,82.

## 6.10 Sensibilidad al contraste mesópica

A continuación, se exponen los resultados obtenidos de sensibilidad al contraste binocular en condiciones de iluminación mesópica, para las siguientes frecuencias espaciales: 3, 6, 12 y 18 cpg.

**Tabla 37. Valores de sensibilidad al contraste binocular mesópica, para cuatro frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg).**

<b>Sensibilidad al contraste mesópica</b>	Valor medio	Valor mín.	Valor máx.
Frecuencia 3 cpg	1,84 ± 0,18	1,17	2,08
Frecuencia 6 cpg	2,05 ± 0,24	1,21	2,29
Frecuencia 12 cpg	1,70 ± 0,34	0,31	1,99
Frecuencia 18 cpg	1,19 ± 0,35	0,13	1,55



**Figura 76. Función de sensibilidad al contraste mesópica.**

### 6.11 Sensibilidad al contraste fotópica

En el siguiente apartado se exponen los datos obtenidos para la SC en condiciones de iluminación fotópica sin y con la interposición de los diferentes filtros (90%, 80% y 70%). Todos los resultados de la sensibilidad al contraste, para las distintas frecuencias espaciales, se expresan en unidades logarítmicas.

#### 6.11.1 Sensibilidad al contraste fotópica sin y con filtros

La función de sensibilidad al contraste para las 4 condiciones evaluadas, sin filtro y con filtro del 90%, 80% y 70% muestran una estructura de normalidad presentándose, en todos los casos, mejores valores de sensibilidad al contraste para frecuencias intermedias (6 cpg), como se puede comprobar en la tabla siguiente. Respecto a los cambios que produce la diferente absorbancia de los filtros interpuestos en la iluminación retiniana, para todas las frecuencias espaciales, el comportamiento es muy semejante para los filtros del 80% y del 70%, obteniéndose peores valores con la interposición del filtro del 90%.

Tabla 38. Valores de sensibilidad al contraste binocular fotópica sin filtro, para cuatro frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg).

<b>Sensibilidad al contraste fotópica</b>	Sin filtro	filtro del 90%	filtro del 80%	filtro del 70%
Frecuencia 3 cpg	1,95 ± 0,12	1,82 ± 0,22	1,92 ± 0,12	1,92 ± 0,13
Frecuencia 6 cpg	2,10 ± 0,26	1,92 ± 0,30	2,00 ± 0,29	2,03 ± 0,25
Frecuencia 12 cpg	1,76 ± 0,28	1,47 ± 0,38	1,61 ± 0,33	1,64 ± 0,34
Frecuencia 18 cpg	1,28 ± 0,30	0,98 ± 0,35	1,11 ± 0,33	1,16 ± 0,39

## 6.12 Influencia de la edad en la sensibilidad al contraste

En relación a la influencia de la edad en la SC, para las dos condiciones de iluminación (fotópica y mesópica) se observaron valores significativamente mayores de SC en los participantes más jóvenes (menores de 50 años), en comparación con el grupo de mayor edad (mayores de 50 años). A continuación, se exponen los valores de SC mesópica y fotópica en ambos grupos de conductores.

### 6.12.1 Sensibilidad al contraste mesópica

La sensibilidad al contraste mesópica alcanza sus valores máximos tanto para el grupo de mayores de 50 años como para el grupo de menores de 50 años para la frecuencia espacial 6 cpg y peores valores para la frecuencia espacial de 18 cpg, siendo, concretamente, más elevada la diferencia entre jóvenes y mayores para esta última ( $0,44 \pm 0,27$  y  $0,29 \pm 0,20$ , respectivamente). En todo caso, los  $p$ -valores de 0,0001 indican una significancia estadística marcada.

**Tabla 39. Valores de sensibilidad al contraste binocular mesópica para las diferentes frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg) en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y  $p$ -valor.**

<b>SC mesópica</b>	Menores de 50 años	Mayores de 50 años	Diferencias	$p$ -valor
Frecuencia 3 cpg	$1,93 \pm 0,14$	$1,72 \pm 0,17$	$0,20 \pm 0,15$	0,0001
Frecuencia 6 cpg	$2,19 \pm 0,12$	$1,90 \pm 0,26$	$0,29 \pm 0,20$	0,0001
Frecuencia 12 cpg	$1,86 \pm 0,15$	$1,50 \pm 0,41$	$0,36 \pm 0,30$	0,0001
Frecuencia 18 cpg	$1,39 \pm 0,20$	$0,95 \pm 0,33$	$0,44 \pm 0,27$	0,0001

## RESULTADOS

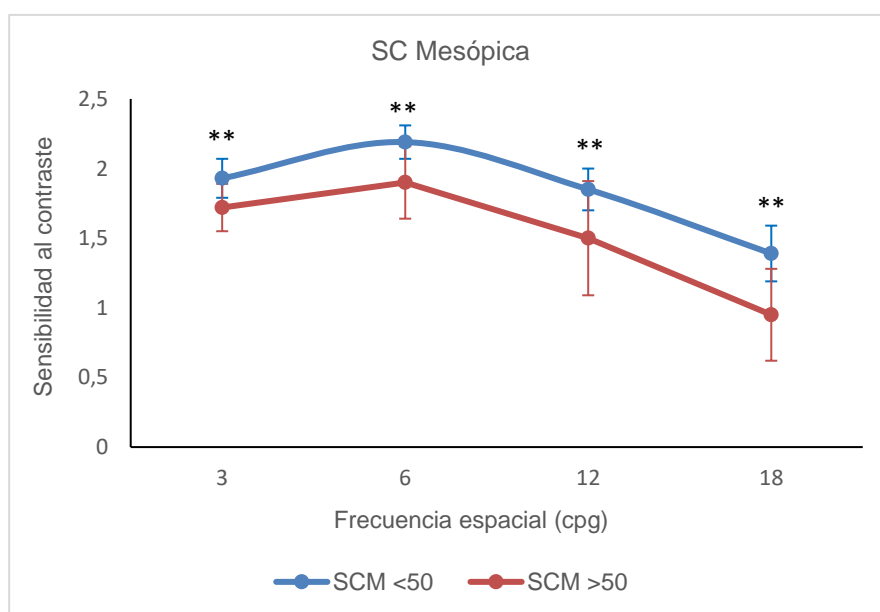


Figura 77. Función de sensibilidad al contraste mesópica: menores y mayores de 50 años.

### 6.12.2 Sensibilidad al contraste fotópica

En este subapartado se exponen los datos y las gráficas de los valores referentes a la sensibilidad al contraste fotópica para las cuatro frecuencias espaciales estudiadas en los dos grupos de edad establecidos. Además, en cuatro gráficas y cuatro tablas se resumen las respuestas de SC binocular fotópica, sin filtro, con filtro de 90%, con filtro de 80% y con filtro de 70% y la influencia de la edad.

Tabla 40. Valores de sensibilidad al contraste binocular fotópica sin filtro para las diferentes frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg) en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y *p*-valor.

SC fotópica sin filtro	Menores de 50 años	Mayores de 50 años	Diferencias	<i>p</i> -valor
Frecuencia 3 cpg	1,99 ± 0,09	1,92 ± 0,14	0,07 ± 0,12	0,0138
Frecuencia 6 cpg	2,22 ± 0,12	1,96 ± 0,31	0,26 ± 0,23	0,0001
Frecuencia 12 cpg	1,87 ± 0,14	1,64 ± 0,35	0,23 ± 0,26	0,0005
Frecuencia 18 cpg	1,44 ± 0,17	1,09 ± 0,31	0,35 ± 0,25	0,0001

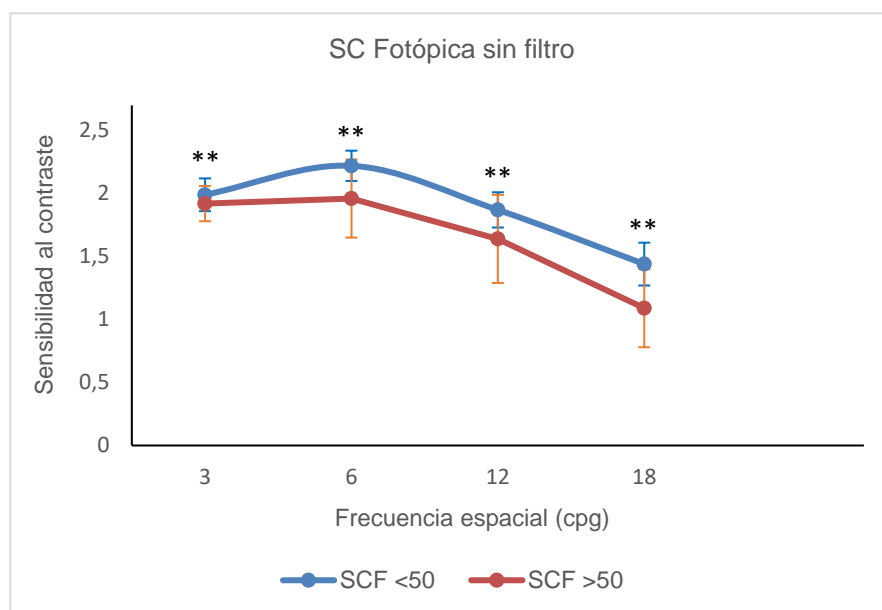
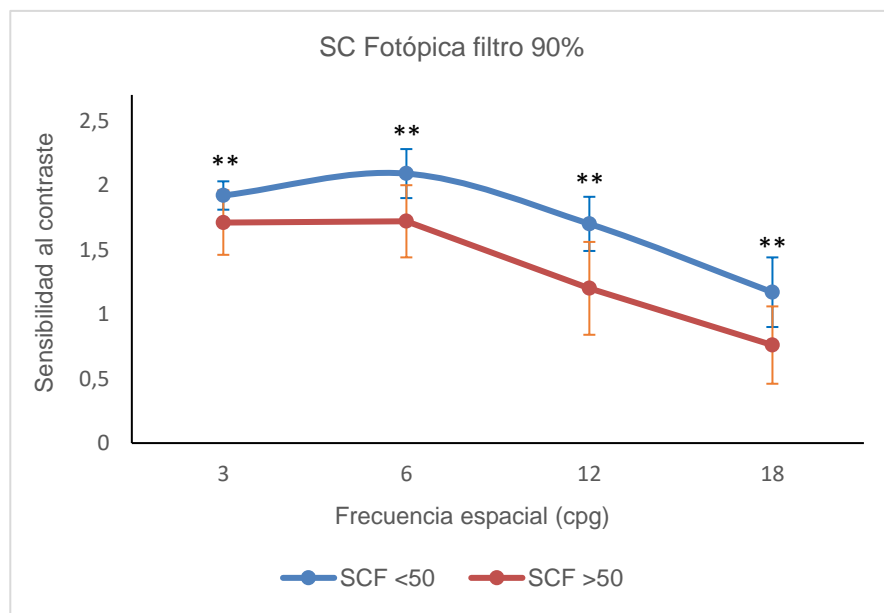


Figura 78. Función de sensibilidad al contraste fotópica sin filtro: menores y mayores de 50 años.

Tabla 41. Valores de sensibilidad al contraste binocular fotópica con filtro de 90% para las diferentes frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg) en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y *p*-valor.

SC fotópica Filtro 90%	Menores de 50 años	Mayores de 50 años	Diferencias	<i>p</i> -valor
Frecuencia 3 cpg	1,92 ± 0,11	1,71 ± 0,25	0,21 ± 0,19	0,0001
Frecuencia 6 cpg	2,09 ± 0,19	1,72 ± 0,28	0,37 ± 0,23	0,0001
Frecuencia 12 cpg	1,70 ± 0,21	1,20 ± 0,36	0,51 ± 0,29	0,0001
Frecuencia 18 cpg	1,17 ± 0,27	0,76 ± 0,30	0,41 ± 0,28	0,0001

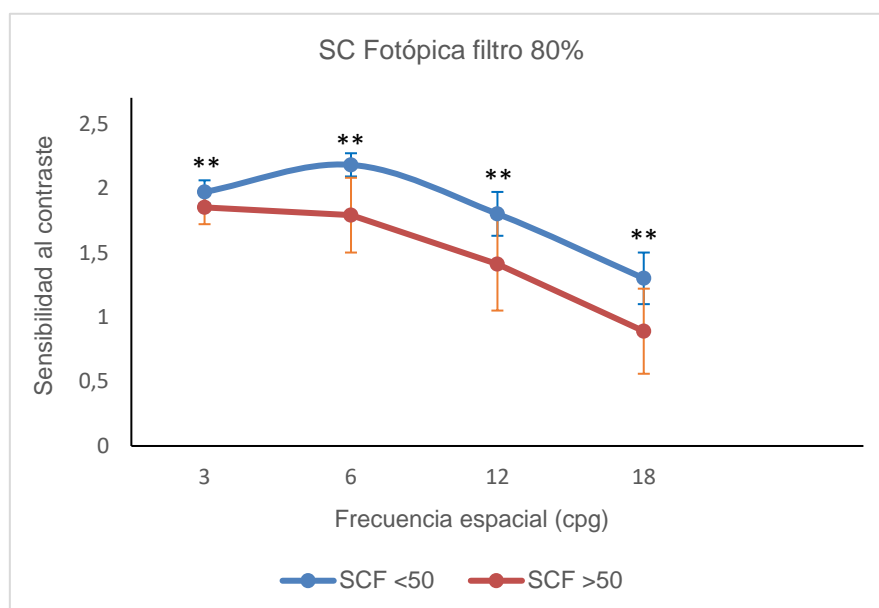
## RESULTADOS



**Figura 79. Función de sensibilidad al contraste fotópica con filtro de 90%: menores y mayores de 50 años.**

**Tabla 42. Valores de sensibilidad al contraste binocular fotópica con filtro de 80% para las diferentes frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg) en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y *p*-valor.**

SC fotópica Filtro 80%	Menores de 50 años	Mayores de 50 años	Diferencias	<i>p</i> -valor
Frecuencia 3 cpg	1,97 ± 0,09	1,85 ± 0,13	0,11 ± 0,11	0,0004
Frecuencia 6 cpg	2,18 ± 0,09	1,79 ± 0,29	0,39 ± 0,21	0,0001
Frecuencia 12 cpg	1,80 ± 0,17	1,41 ± 0,36	0,38 ± 0,20	0,0001
Frecuencia 18 cpg	1,30 ± 0,20	0,89 ± 0,33	0,40 ± 0,26	0,0001

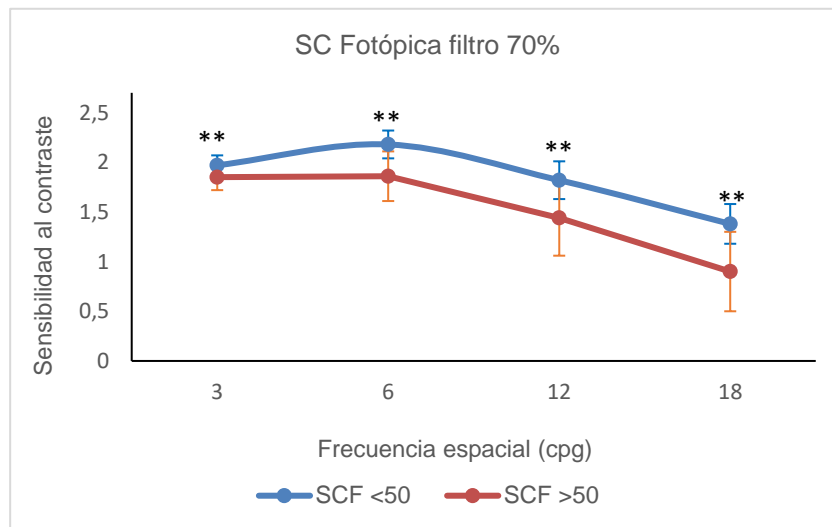


**Figura 80. Función de sensibilidad al contraste fotópica con filtro de 80%: menores y mayores de 50 años.**

**Tabla 43. Valores de sensibilidad al contraste binocular fotópica con filtro de 70% para las diferentes frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg) en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y *p*-valor.**

SC fotópica Filtro 70%	Menores de 50 años	Mayores de 50 años	Diferencias	<i>p</i> -valor
Frecuencia 3 cpg	1,97 ± 0,10	1,85 ± 0,13	0,12 ± 0,12	0,0001
Frecuencia 6 cpg	2,18 ± 0,14	1,86 ± 0,25	0,31 ± 0,20	0,0001
Frecuencia 12 cpg	1,82 ± 0,19	1,44 ± 0,38	0,38 ± 0,29	0,0001
Frecuencia 18 cpg	1,38 ± 0,20	0,90 ± 0,40	0,47 ± 0,31	0,0001

## RESULTADOS



**Figura 81. Función de sensibilidad al contraste fotópica con filtro de 70%: menores y mayores de 50 años.**

**Tabla 44. Diferencias de SC fotópica entre los grupos de menores y mayores de 50 años, para las frecuencias espaciales de 3, 6, 12 y 18 cpg, sin y con la interposición de filtros de 90%, 80% y 70%.**

Diferencia de SC (entre menores y mayores de 50 años)	Sin filtro	filtro 90%	filtro 80%	filtro 70%
Frecuencia 3 cpg	0,07 ± 0,12	0,21 ± 0,19	0,11 ± 0,11	0,12 ± 0,12
Frecuencia 6 cpg	0,26 ± 0,23	0,37 ± 0,23	0,39 ± 0,21	0,31 ± 0,20
Frecuencia 12 cpg	0,23 ± 0,26	0,51 ± 0,29	0,38 ± 0,20	0,38 ± 0,29
Frecuencia 18 cpg	0,35 ± 0,25	0,41 ± 0,28	0,40 ± 0,26	0,47 ± 0,31

Como se puede valorar, las diferencias de sensibilidad al contraste son importantes para las diferentes frecuencias espaciales. Se manifiesta una tendencia muy semejante en todas las condiciones de evaluación.



### 6.13 Relación entre la sensibilidad al contraste mesópica y fotópica

Para calcular un predictor de la SC mesópica a partir de la SC fotópica, se estudió por separado cada una de las frecuencias espaciales: 3, 6, 12 y 18 cpg. Para ello se generó la variable diferencia, siendo ésta:  $\text{dif} = F_x \text{SC}_y - \text{MSC}_y$ ; Resultando de restar la SC fotópica (sin y con la interposición de filtro, siendo x: sin filtro, con filtro de 90%, con filtro de 80% y con filtro de 70%) para cada una de las frecuencias espaciales (y: 3,6,12 y 18cpg) con la SC mesópica.

A continuación, se exponen todas estas diferencias, en tablas y figuras para una mejor comprensión.

**Tabla 45. Diferencia entre sensibilidad al contraste fotópica sin filtro y sensibilidad al contraste mesópica.**

SC fotópica sin filtro- SC mesópica	
3 cpg	0,12 ± 0,19
6 cpg	0,05 ± 0,20
12 cpg	0,06 ± 0,31
18 cpg	0,09 ± 0,21

**Tabla 46. Diferencia entre sensibilidad al contraste fotópica con filtro de 90% y sensibilidad al contraste mesópica.**

SC fotópica filtro 90% - SC mesópica	
<b>3 cpg</b>	<b>-0,01 ± 0,18</b>
6 cpg	-0,14 ± 0,21
12 cpg	-0,23 ± 0,28
18 cpg	-0,20 ± 0,24

## RESULTADOS

Tabla 47. Diferencia entre sensibilidad al contraste fotópica con filtro de 80% y sensibilidad al contraste mesópica.

SC fotópica filtro 80% - SC mesópica	
3 cpg	0,08 ± 0,16
6 cpg	-0,05 ± 0,22
12 cpg	-0,08 ± 0,28
18 cpg	-0,08 ± 0,24

Tabla 48. Diferencia entre sensibilidad al contraste fotópica con filtro de 70% y sensibilidad al contraste mesópica.

SC fotópica filtro 70% - SC mesópica	
3 cpg	0,08 ± 0,17
6 cpg	<b>-0,02 ± 0,20</b>
12 cpg	<b>-0,05 ± 0,24</b>
18 cpg	<b>-0,03 ± 0,26</b>

Los valores de SC fotópica que mejor se relacionan con la SC mesópica son los que dan lugar a una diferencia más cercana a 0 en valor absoluto. En los siguientes apartados se estudian cuáles son los más semejantes para cada frecuencia espacial con el objeto de poder sustituir la valoración de la SC mesópica por la valoración fotópica de la sensibilidad al contraste con la interposición de filtros de densidad óptica neutra.

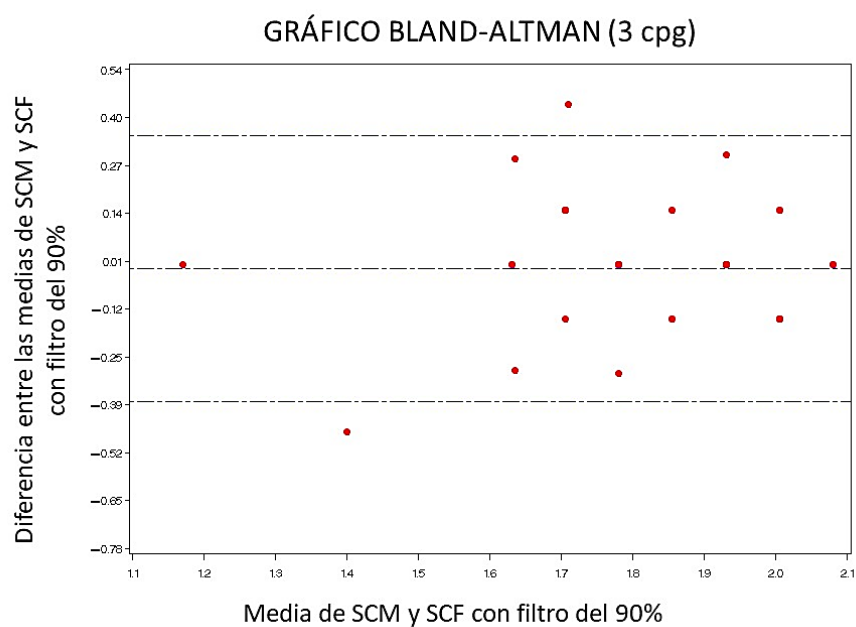
Para cada una de ellas exponen el coeficiente de correlación de Pearson (R), el *p*-valor y el coeficiente de correlación intraclase (ICC) para evaluar la consistencia de las medidas. Además, para analizar la relación entre las variables (cuantitativas) se representa en un gráfico tipo Bland-Altman la diferencia de las medias entre la media de las dos medidas.

### 6.13.1 Frecuencia espacial 3 cpg

El valor que más se asemeja, en promedio, a la SC mesópica de 3 cpg, es el de SC fotópica con filtro de 90%.

**Tabla 49. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 90% para la frecuencia espacial de 3 cpg: media de SC mesópica, media de SC fotópica 90%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), *p*-valor y coeficiente de correlación intraclass (ICC).**

SC Mesópica	SC Fotópica 90%	Diferencia (SCF-SCM)	R	<i>p</i> -valor	ICC
1,84 ± 0,18	1,82 ± 0,22	-0,01 ± 0,18	0,60	0,0001	0,6



**Figura 82. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 90% para una frecuencia espacial de 3 cpg**

RESULTADOS

6.13.2 Frecuencia espacial 6 cpg

El valor que más se asemeja, en promedio, a la SC mesópica para 6 cpg, es el de SC fotópica con filtro de 70%.

Tabla 50. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 70% para la frecuencia espacial de 6 cpg: media de SC mesópica, media de SC fotópica 70%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), *p*-valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC).

SC Mesópica	SC Fotópica 70%	Diferencia (SCF-SCM)	R	<i>p</i> -valor	ICC
2,05 ± 0,24	2,03 ± 0,25	-0,02 ± 0,20	0,69	0,0001	0,69

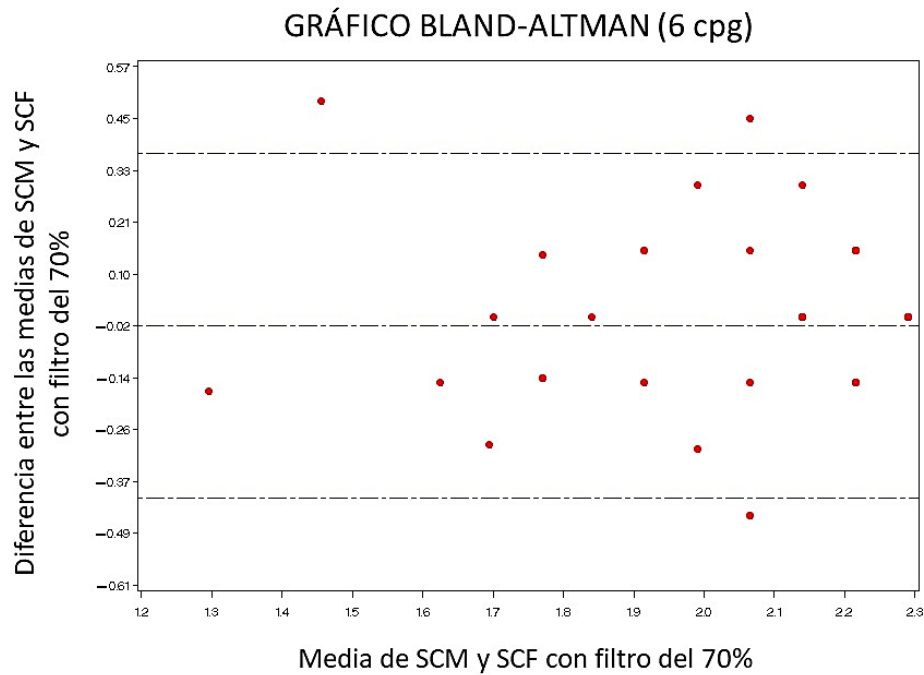


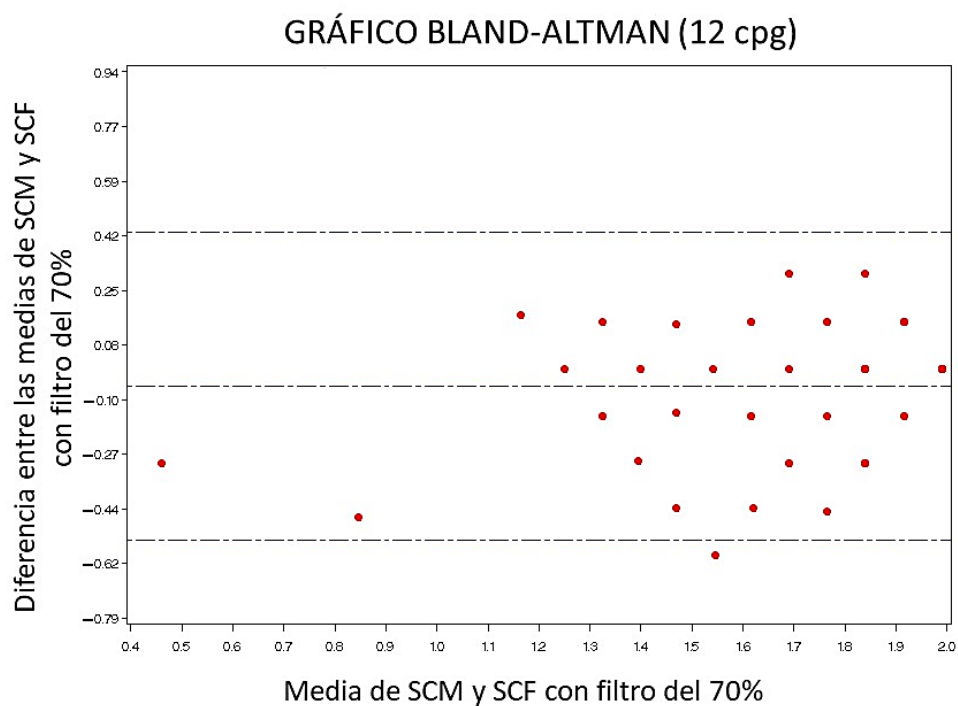
Figura 83. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 70% para una frecuencia espacial de 6 cpg

### 6.13.3 Frecuencia espacial 12 cp/g

El valor que más se asemeja, en promedio, a la SC mesópica para 12 cp/g, es el de SC fotópica con filtro de 70%.

**Tabla 51. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 70% para la frecuencia espacial de 12 cp/g: media de SC mesópica, media de SC fotópica 70%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), *p*-valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC).**

SC Mesópica	SC Fotópica 70%	Diferencia (SCF-SCM)	R	<i>p</i> -valor	ICC
1,70 ± 0,34	1,64 ± 0,34	-0,05 ± 0,24	0,75	0,0001	0,74



**Figura 84. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 70% para una frecuencia espacial de 12 cp/g.**

RESULTADOS

6.13.4 Frecuencia espacial 18 cpg

El valor que más se asemeja, en promedio, a la SC mesópica para 18 cpg, es el de SC fotópica con filtro de 70%.

Tabla 52. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 70% para la frecuencia espacial de 18 cpg: media de SC mesópica, media de SC fotópica 70%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), *p*-valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC).

SC Mesópica	SC Fotópica 70%	Diferencia (SCF-SCM)	R	<i>p</i> -valor	ICC
1,19 ± 0,35	1,16 ± 0,39	-0,03 ± 0,26	0,75	0,0001	0,74

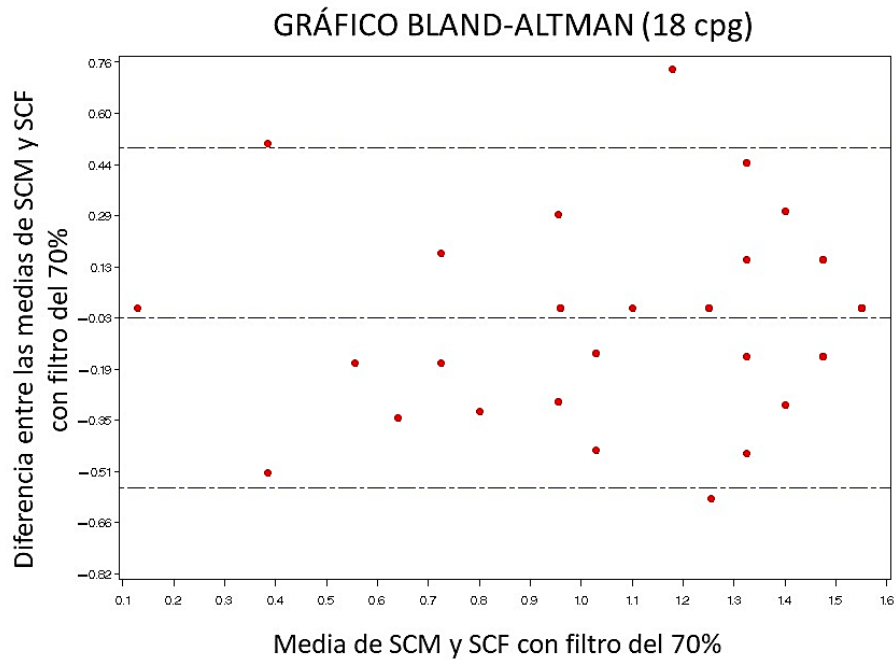


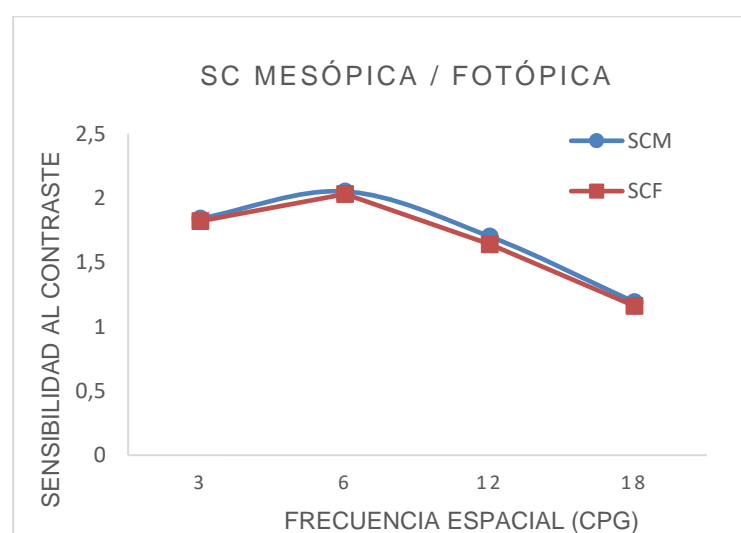
Figura 85. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 70% para una frecuencia espacial de 18 cpg.

Se ha realizado una tabla resumen con los resultados obtenidos:

**Tabla 53. Valores promedio de SC mesópica y fotópica (medida con diferentes filtros) para las frecuencias espaciales 3, 6, 12 y 18 cpq. Se muestra la diferencia entre las medidas y el Índice de correlación intraclass o ICC para estudiar la consistencia entre las medidas.**

Frecuencia espacial (cpq)	SC Mesópica	SC Fotópica	Filtro	Diferencia (SCF-SCM)	ICC
3	1,84 ± 0,18	1,82 ± 0,22	90%	-0,01 ± 0,18	0,60
6	2,05 ± 0,24	2,03 ± 0,25	70%	-0,02 ± 0,20	0,69
12	1,70 ± 0,34	1,64 ± 0,34	70%	-0,05 ± 0,24	0,74
18	1,19 ± 0,35	1,16 ± 0,39	70%	-0,03 ± 0,26	0,74

En todas las frecuencias espaciales el coeficiente de correlación intraclass (ICC) es alto: las medidas tienen una buena correlación. Igualmente, las curvas de SC mesópica y SC fotópica (filtro de 90% - 3cpq y filtro de 70% - 6, 12 y 18 cpq) son bastante coincidentes, lo que implica que los valores de SC son bastante próximos entre sí.



**Figura 86. Función de sensibilidad al contraste mesópica (azul) y fotópica (granate) (3cpq: filtro de 90%; 6,12 y 18 cpq: filtro de 70%).**

## RESULTADOS

Como se ha hecho anteriormente con la AV, para la SC también se ha estudiado la relación entre las dos iluminaciones (fotópica y mesópica), separando la muestra en dos grupos: menores y mayores de 50 años.

### 6.14 Relación entre la sensibilidad al contraste mesópica y fotópica en menores de 50 años

A continuación, se exponen las mismas tablas y figuras que en el epígrafe anterior, pero segmentando la muestra para el grupo de menores 50 años.

Tabla 54. Diferencia entre sensibilidad al contraste fotópica sin filtro y sensibilidad al contraste mesópica para menores 50 años.

SC fotópica sin filtro- SC mesópica	
3 cpg	0,06 ± 0,15
6 cpg	0,03 ± 0,17
<b>12 cpg</b>	<b>0,00 ± 0,14</b>
18 cpg	0,05 ± 0,21

Tabla 55. Diferencia entre sensibilidad al contraste fotópica con filtro de 90% y sensibilidad al contraste mesópica para menores de 50 años.

SC fotópica filtro 90% - SC mesópica	
<b>3 cpg</b>	<b>-0,00 ± 0,10</b>
6 cpg	-0,10 ± 0,19
12 cpg	-0,16 ± 0,20
18 cpg	-0,22 ± 0,25



Tabla 56. Diferencia entre SC fotópica con filtro de 80% y SC mesópica para menores de 50 años.

SC fotópica filtro 80% - SC mesópica	
3 cpg	0,04 ± 0,15
<b>6 cpg</b>	<b>-0,00 ± 0,15</b>
12 cpg	-0,07 ± 0,16
18 cpg	-0,10 ± 0,18

Tabla 57. Diferencia entre SC fotópica con filtro de 70% y SC mesópica para menores de 50 años.

SC fotópica filtro 70% - SC mesópica	
3 cpg	0,04 ± 0,17
6 cpg	-0,01 ± 0,18
12 cpg	-0,04 ± 0,17
<b>18 cpg</b>	<b>-0,01 ± 0,24</b>

Los valores de SC fotópica, que mejor se relacionan con la SC mesópica son los que dan lugar a una diferencia más cercana a 0 en valor absoluto. En los siguientes apartados se estudian cuáles son los más semejantes para cada frecuencia espacial.

Para cada una de ellas se estudiará, a continuación, el coeficiente de correlación de Pearson (R), el *p*-valor y el coeficiente de correlación intraclase (ICC) para evaluar la consistencia de las medidas. Además, para analizar la relación entre las variables (cuantitativas) se representa en un gráfico tipo Bland-Altman la diferencia de las medias entre la media de las dos medidas.

RESULTADOS

6.14.1 Frecuencia espacial 3 cpg

El valor que más se asemeja en promedio a la SC mesópica de 3 cpg, es el de SC fotópica con filtro de 90%.

Tabla 58. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 90% para la frecuencia espacial de 3 cpg: media de SC mesópica, media de SC fotópica 90%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), *p*-valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para menores de 50 años.

SC Mesópica	SC Fotópica 90%	Diferencia (SCF-SCM)	R	<i>p</i> -valor	ICC
1,93 ± 0,14	1,92 ± 0,10	-0,00 ± 0,10	0,68	0,0001	0,67

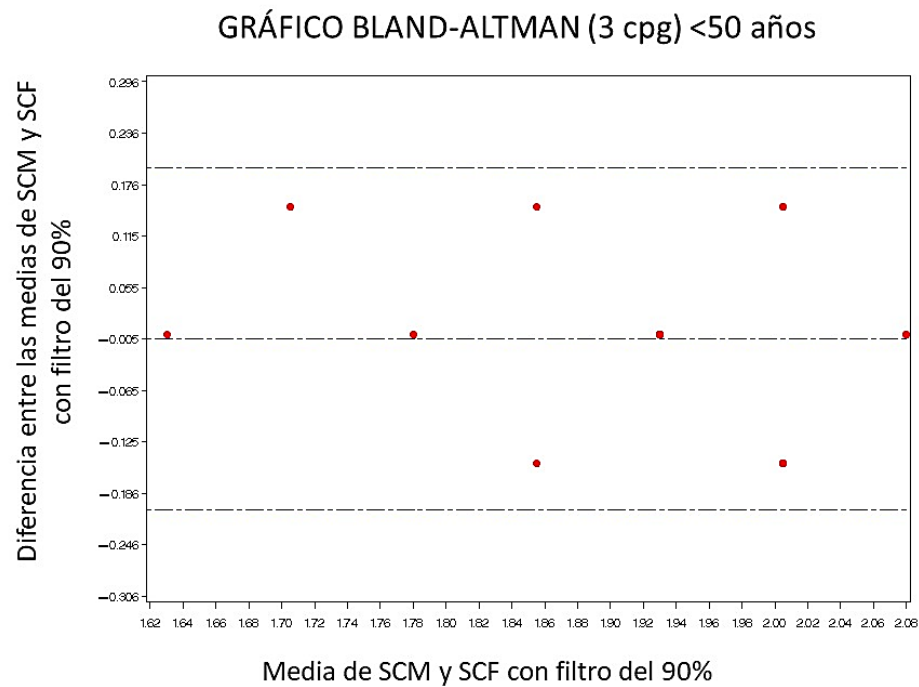


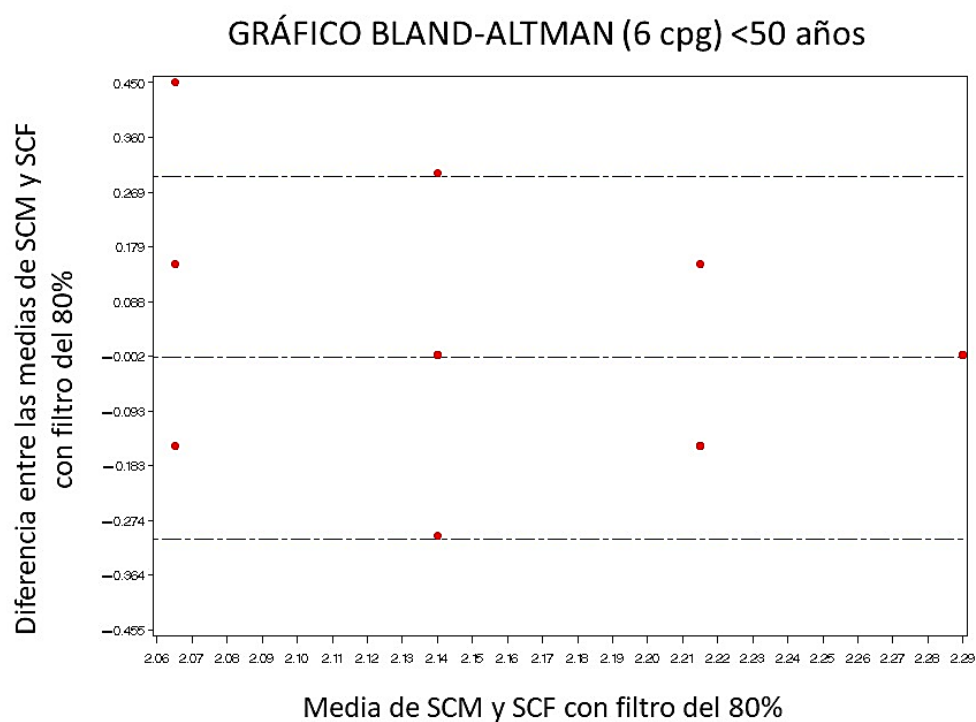
Figura 87. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 90% para una frecuencia espacial de 3 cpg en menores de 50 años.

### 6.14.2 Frecuencia espacial 6 cpG

El valor que más se asemeja en promedio a la SC mesópica para 6 cpG, es el de SC fotópica con filtro de 80%.

**Tabla 59. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 80% para la frecuencia espacial de 6 cpG: media de SC mesópica, media de SC fotópica 80%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), *p*-valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para menores de 50 años.**

SC Mesópica	SC Fotópica 80%	Diferencia (SCF-SCM)	R	<i>p</i> -valor	ICC
2,19 ± 0,27	2,18 ± 0,09	-0,00 ± 0,15	0,06	0,0001	0,06



**Figura 88. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 80% para una frecuencia espacial de 6 cpG en menores de 50 años.**

RESULTADOS

6.14.3 Frecuencia espacial 12 cpg

El valor que más se asemeja en promedio a la SC mesópica para 12 cpg, es el de SC fotópica sin filtro.

Tabla 60. Relación entre SC mesópica y SC fotópica sin filtro para la frecuencia espacial de 12 cpg: media de SC mesópica, media de SC fotópica sin filtro, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), *p*-valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para menores de 50 años.

SC Mesópica	SC Fotópica sin filtro	Diferencia (SCF-SCM)	R	<i>p</i> -valor	ICC
1,86 ± 0,14	1,87 ± 0,14	0,00 ± 0,14	0,55	0,0001	0,56

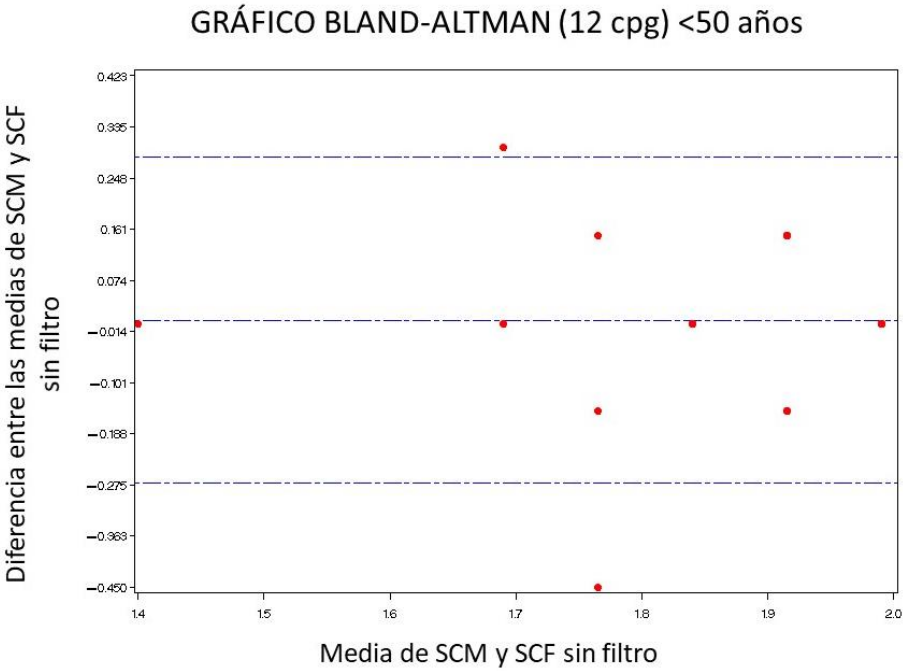


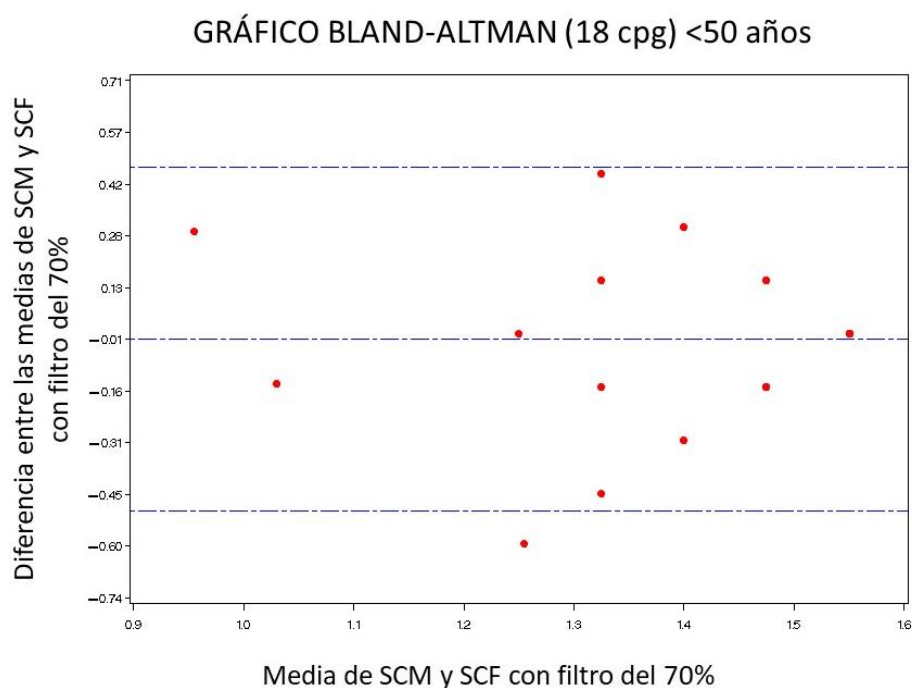
Figura 89. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica sin filtro para una frecuencia espacial de 12 cpg en menores de 50 años.

#### 6.14.4 Frecuencia espacial 18 cpg

El valor que más se asemeja en promedio a la SC mesópica para 18 cpg, es el de SC fotópica con filtro de 70%.

**Tabla 61. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 70% para la frecuencia espacial de 18 cpg: media de SC mesópica, media de SC fotópica 70%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), *p*-valor y coeficiente de correlación intraclass (ICC) para menores de 50 años.**

SC Mesópica	SC Fotópica 70%	Diferencia (SCF-SCM)	R	<i>p</i> -valor	ICC
1,39 ± 0,38	1,38 ± 0,20	-0,01 ± 0,24	0,26	0,0001	0,27



**Figura 90. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 70% para una frecuencia espacial de 18 cpg en menores de 50 años.**

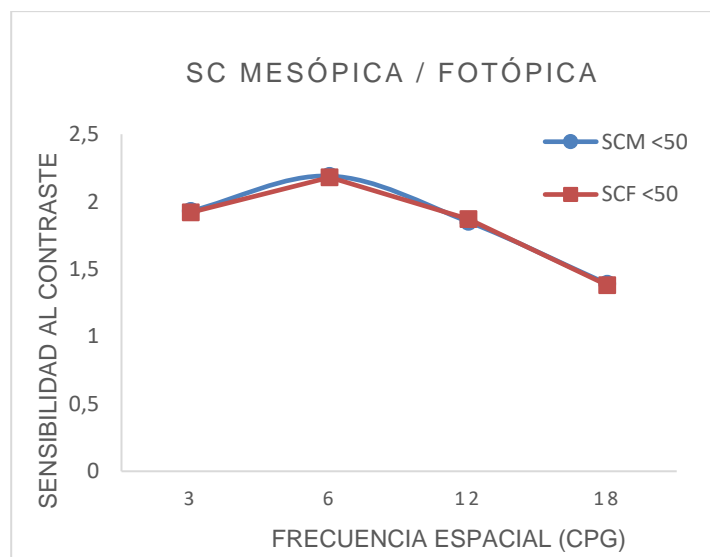
## RESULTADOS

En resumen, los datos obtenidos para el grupo de menores de 50 años ha sido el siguiente:

**Tabla 62. Valores promedio de SC mesópica y fotópica en menores de 50 años (medida con diferentes filtros) para las frecuencias espaciales 3, 6, 12 y 18 cpg. Se muestra la diferencia entre las medidas y el índice de correlación intraclase o ICC para estudiar la consistencia entre las medidas.**

Frecuencia espacial (cpg)	SC Mesópica	SC Fotópica	Filtro	Diferencia (SCF-SCM)	ICC
3	1,93 ± 0,14	1,92 ± 0,10	90%	-0,00 ± 0,10	0,67
6	2,19 ± 0,12	2,18 ± 0,09	80%	-0,00 ± 0,15	0,06
12	1,86 ± 0,15	1,87 ± 0,14	Sin filtro	0,00 ± 0,14	0,56
18	1,39 ± 0,20	1,38 ± 0,20	70%	-0,01 ± 0,24	0,27

Casi todas las frecuencias espaciales presentan un ICC bajo, sin embargo, las curvas de SC mesópica y SC fotópica (filtro de 90% - 3cpg, filtro de 80% - 6 cpg, sin filtro – 12 cpg y filtro 70% - 18 cpg) son bastante coincidentes.



**Figura 91. Función de sensibilidad al contraste mesópica y fotópica (3cpg: filtro de 90%; 6: filtro de 80%, 12: sin filtro y 18 cpg: filtro de 70%).**

### 6.15 Relación entre la sensibilidad al contraste mesópica y fotópica en mayores de 50 años

Para finalizar el apartado de resultados, a continuación, se muestran las mismas tablas y figuras que en el anterior, pero para mayores 50 años.

Tabla 63. Diferencia entre SC fotópica sin filtro y SC mesópica para mayores de 50 años.

SC fotópica sin filtro- SC mesópica	
3 cpg	0,19 ± 0,21
6 cpg	0,06 ± 0,22
12 cpg	0,13 ± 0,43
18 cpg	0,14 ± 0,20

Tabla 64. Diferencia entre SC fotópica con filtro de 90% y SC mesópica para mayores de 50 años.

SC fotópica filtro 90% - SC mesópica	
3 cpg	<b>-0,02 ± 0,25</b>
6 cpg	-0,18 ± 0,22
12 cpg	-0,30 ± 0,34
18 cpg	-0,19 ± 0,24

Tabla 65. Diferencia entre SC fotópica con filtro de 80% y SC mesópica para mayores de 50 años.

SC fotópica filtro 80% - SC mesópica	
3 cpg	0,13 ± 0,16
6 cpg	-0,11 ± 0,27
12 cpg	-0,09 ± 0,37
18 cpg	-0,06 ± 0,30

## RESULTADOS

Tabla 66. Diferencia entre SC fotópica con filtro de 70% y SC mesópica para mayores de 50 años.

SC fotópica filtro 70% - SC mesópica	
3 cpg	0,12 ± 0,16
6 cpg	<b>-0,03 ± 0,21</b>
12 cpg	<b>-0,06 ± 0,31</b>
18 cpg	<b>-0,05 ± 0,29</b>

Los valores de SC fotópica, que mejor se relacionan con la SC mesópica son los que dan lugar a una diferencia más cercana a 0 en valor absoluto. En los siguientes apartados se estudian cuáles son los más semejantes para cada frecuencia espacial.

Al igual que en los epígrafes anteriores, para cada una de ellas se estudiará, a continuación, el coeficiente de correlación de Pearson (R), el *p*-valor y el coeficiente de correlación intraclase (ICC) para evaluar la consistencia de las medidas. Además, para analizar la relación entre las variables (cuantitativas) se representa en un gráfico tipo Bland-Altman la diferencia de las medias entre la media de las dos medidas.

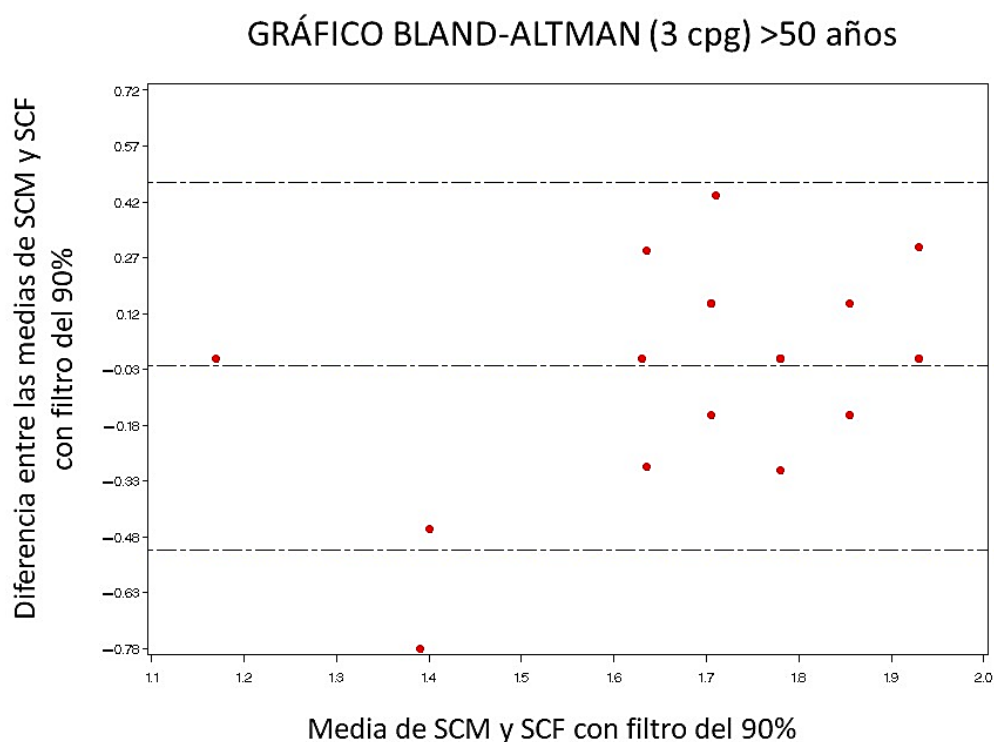


### 6.15.1 Frecuencia espacial 3 cpv

El valor que más se asemeja en promedio a la SC mesópica de 3 cpv, es el de SC fotópica con filtro de 90%.

**Tabla 67. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 90% para la frecuencia espacial de 3 cpv: media de SC mesópica, media de SC fotópica 90%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), *p*-valor y coeficiente de correlación intraclass (ICC) para mayores de 50 años.**

SC Mesópica	SC Fotópica 90%	Diferencia (SCF-SCM)	R	<i>p</i> -valor	ICC
1,73 ± 0,17	1,71 ± 0,25	-0,02 ± 0,25	0,37	0,0001	0,36



**Figura 92. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 90% para una frecuencia espacial de 3 cpv en mayores de 50 años.**

RESULTADOS

6.15.2 Frecuencia espacial 6 cpv

El valor que más se asemeja en promedio a la SC mesópica para 6 cpv, es el de SC fotópica con filtro de 70%.

Tabla 68. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 70% para la frecuencia espacial de 6 cpv: media de SC mesópica, media de SC fotópica 70%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), p-valor y coeficiente de correlación intraclass (ICC) para mayores de 50 años.

SC Mesópica	SC Fotópica 70%	Diferencia (SCF-SCM)	R	p-valor	ICC
1,90 ± 0,26	1,86 ± 0,25	-0,03 ± 0,21	0,65	0,0001	0,65

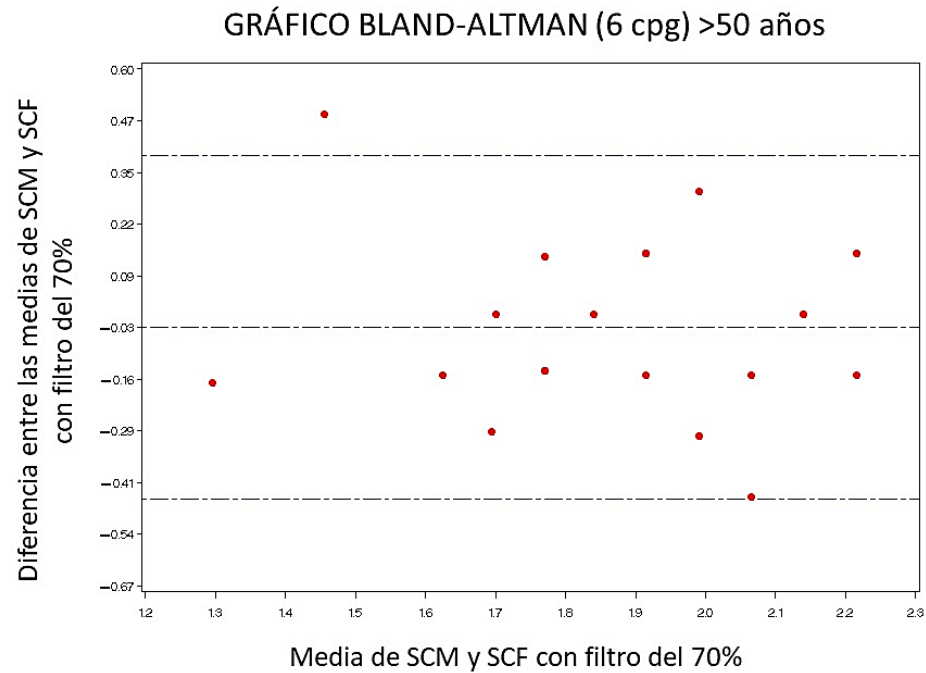


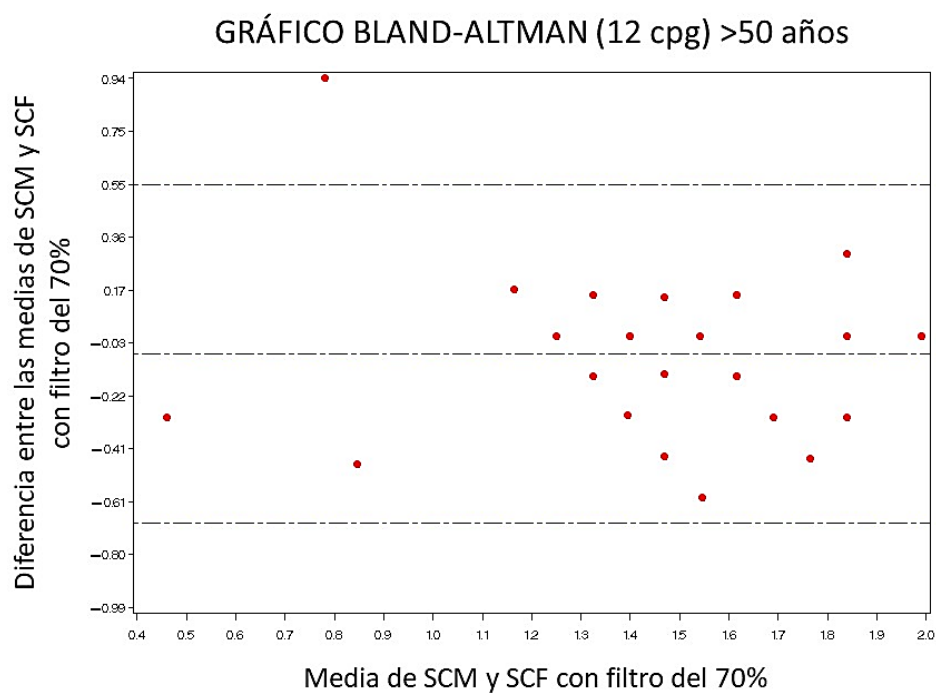
Figura 93. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 70% para una frecuencia espacial de 6 cpv en mayores de 50 años.

### 6.15.3 Frecuencia espacial 12 cpv

El valor que más se asemeja en promedio a la SC mesópica para 12 cpv, es el de SC fotópica con filtro de 70%.

**Tabla 69. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 70% para la frecuencia espacial de 12 cpv: media de SC mesópica, media de SC fotópica 70%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), *p*-valor y coeficiente de correlación intraclass (ICC) para mayores de 50 años.**

SC Mesópica	SC Fotópica 70%	Diferencia (SCF-SCM)	R	<i>p</i> -valor	ICC
1,50 ± 0,41	1,44 ± 0,38	-0,06 ± 0,31	0,70	0,0001	0,70



**Figura 94. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 70% para una frecuencia espacial de 12 cpv**

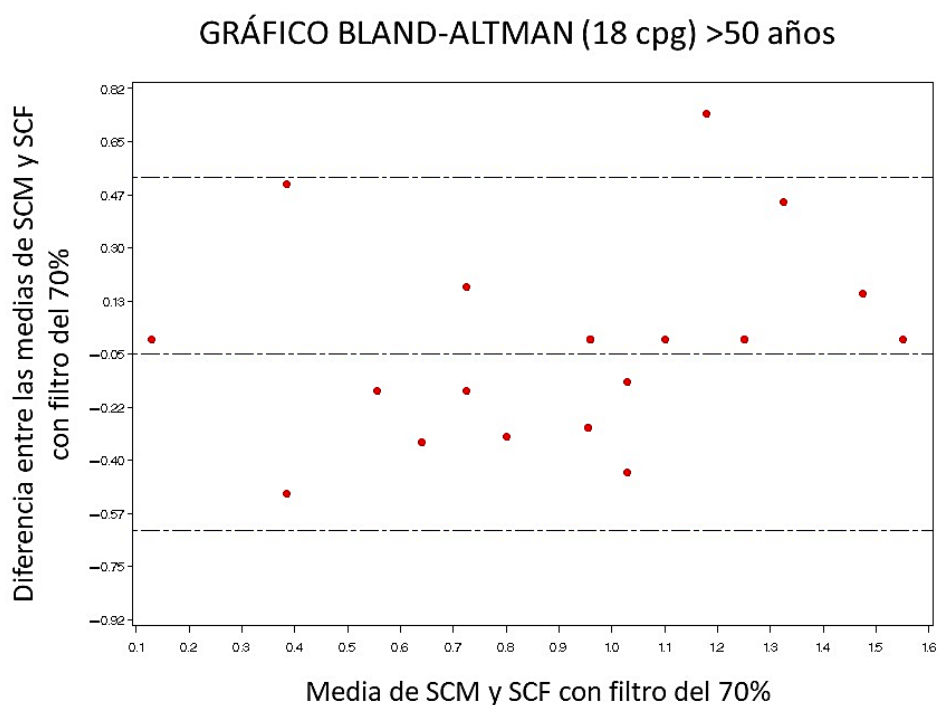
## RESULTADOS

### 6.15.4 Frecuencia espacial 18 cpg

El valor que más se asemeja en promedio a la SC mesópica para 18 cpg, es el de SC fotópica con filtro de 70%.

**Tabla 70. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 70% para la frecuencia espacial de 18 cpg: media de SC mesópica, media de SC fotópica 70%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), *p*-valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para mayores de 50 años.**

SC Mesópica	SC Fotópica 70%	Diferencia (SCF-SCM)	R	<i>p</i> -valor	ICC
0,95 ± 0,36	0,90 ± 0,43	-0,05 ± 0,29	0,70	0,0001	0,70



**Figura 95. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 70% para una frecuencia espacial de 18 cpg en mayores de 50 años.**

En resumen, los datos obtenidos para el grupo de mayores de 50 años ha sido el siguiente:

Tabla 71. Valores promedio de SC mesópica y fotópica en mayores de 50 años (medida con diferentes filtros) para las frecuencias espaciales 3, 6, 12 y 18 cpg. Se muestra la diferencia entre las medidas y el Índice de correlación intraclass o ICC para estudiar la consistencia entre las medidas

Frecuencia espacial (cpg)	SC Mesópica	SC Fotópica	Filtro	Diferencia (SCF-SCM)	ICC
3	1,72 ± 0,17	1,71 ± 0,25	90%	-0,02 ± 0,25	0,36
6	1,90 ± 0,26	1,86 ± 0,25	70%	-0,03 ± 0,21	0,65
12	1,50 ± 0,41	1,44 ± 0,38	70%	-0,06 ± 0,31	0,70
18	0,95 ± 0,33	0,90 ± 0,43	70%	-0,05 ± 0,29	0,70

Todas las frecuencias espaciales presentan un ICC elevado, exceptuando para 3 cpg. Así mismo las curvas de SC mesópica y SC fotópica (filtro de 90% - 3 cpg, filtro de 70% - 6, 12 y 18 cpg) son bastante coincidentes.

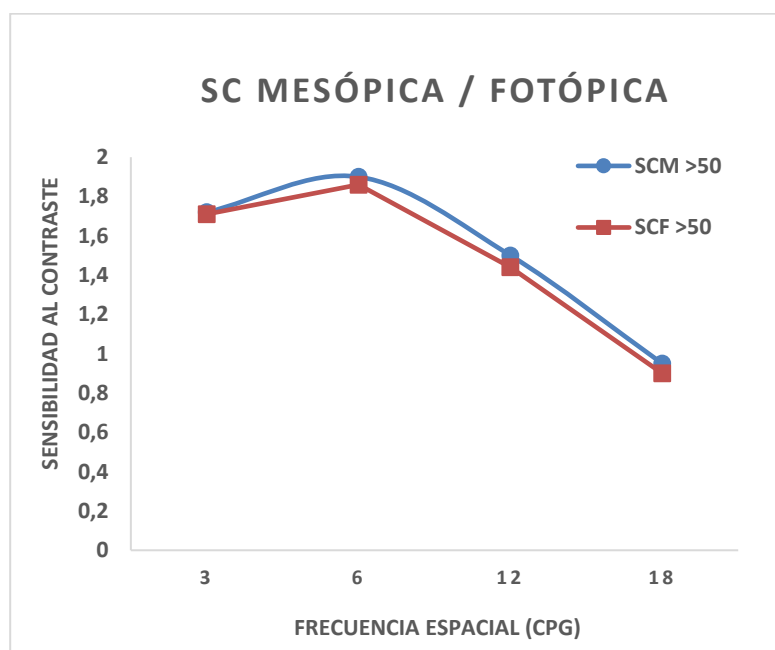


Figura 96. Función de sensibilidad al contraste mesópica y fotópica (3cpg: filtro de 90%; 6,12 y 18 cpg: filtro de 70%).



## DISCUSIÓN

---





## 7 DISCUSIÓN

Este apartado se ha dividido en tres partes: primeramente, se presenta una discusión de las características generales de la conducción; a continuación, una evaluación de los métodos de medida empleados y, finalmente, se argumentan los resultados obtenidos en los parámetros de la función visual que se han estudiado.

### 7.1 Aspectos generales de la conducción

Los factores que determinan la conducción de un vehículo de forma segura son los siguientes: el estado funcional del usuario, el vehículo y las condiciones de las vías de tránsito (139, 140). Pero es el conductor, en último momento, con la toma de elecciones, quien tiene el compromiso de una correcta y segura conducción. Conducir es una labor eminentemente visual, donde importan las funciones de percepción y las habilidades motoras; siendo la función visual el medio más relevante de información perceptual para el conductor (141). Conducir en un estado en el que estén comprometidas las habilidades necesarias para llevar a cabo un buen desempeño de esta labor, puede tener como consecuencias daños y lesiones a uno mismo y a los demás (96, 142).

Se han realizado desde hace años, un gran número de estudios para relacionar las capacidades visuales con el rendimiento de la conducción, dejando constancia de que la tarea de conducir requiere óptimas tareas visuales que permitan la máxima seguridad en el manejo del vehículo (143-147). Los accidentes de tráfico son un problema de Salud Pública, especialmente grave que originan un alto índice de mortalidad, morbilidad y discapacidades. A nivel mundial la siniestralidad derivada de los accidentes de circulación es un inconveniente de primera magnitud siendo la cuarta causa de mortalidad en el mundo (148, 149).

En la década de los 90 se predijo en el “Global Burden of Disease Study”, que las lesiones vinculadas con el tráfico se volverían, en el año 2022, en la tercera causa en el mundo de fallecimiento y discapacidad (150). En 1992 se

estableció el estándar de revisión de la función visual de los conductores europeos en la Directiva 91/439/EEC (1991). Posteriormente, en 2003 se propuso una pequeña revisión del mismo. Ya en el año 2004, el Comité Europeo de conducción (EC Driving Licence Committee) instauró el Grupo de Trabajo de la Visión (The Eyesight Working Group) para preparar un pormenorizado análisis de los estándares requeridos.

En 2005, este grupo europeo anunció un informe titulado: “Nuevo estándar para la función visual de los conductores” (ver anexo 6); donde abordaron recomendaciones referentes al permiso de conducción. Se menciona explícitamente en sus conclusiones que los indicadores visuales más relevantes para la seguridad en la conducción son, por orden de relevancia, el campo visual, la sensibilidad al contraste, la sensibilidad al deslumbramiento y la agudeza visual.

Más tarde, en el 2009, se modificó dicho informe por la Directiva 2009/113/EC (ver anexo 7). Entre los cambios propuestos cabe destacar, la denegación del permiso de conducción a quien padecía trastornos de la SC, aunque en el estudio no se especifican valores de corte de ésta. La falta de valores concretos queda explicada con la siguiente argumentación: *“la medida de la sensibilidad al contraste y la de sensibilidad al deslumbramiento es menos aplicable que la medición de la agudeza visual, ya que se carece de suficientes conocimientos sobre los valores de corte y sobre la prevalencia de la discapacidad en la población de conductores”*. Esto realza el valor de la AV, como parámetro definitorio, ya que esta característica de la visión está delimitada claramente. Por esta razón, en la presente Tesis Doctoral uno de los principales objetivos ha sido evaluar la AV en los conductores, además de la SC.

La Directiva Europea indica que, al no haberse armonizado plenamente los requisitos de aptitud para la conducción en los Estados miembros de la Unión Europea, cada Estado puede imponer normas más rígidas que los requisitos mínimos de la Directiva Europea, pudiendo publicar normativas específicas en cada país (151). En consecuencia y siguiendo la recomendación europea, en España se dicta una normativa que da entrada a la Directiva Europea a través

del Real Decreto 818/2009 de 8 de mayo de 2009, publicado el 9 de junio de 2009 y a su vez modificado por la orden PRE/2356/2010 de 3 de septiembre de 2010, publicada el 10 de septiembre de 2010. Este Real Decreto introduce explícitamente los parámetros ya comentados de los requerimientos mínimos de la función visual para el permiso de conducción de vehículos (anexo 7).

En general, se ha prestado poca atención a la prevalencia del deterioro de la función visual en la población de conductores, a pesar de ser un indicador muy importante en la normativa actual. En la actualidad, gran número de investigaciones están enfocadas en el vínculo de la conducción segura y el deterioro de las funciones visuales, con el fin de mejorar estas normas (54, 152). Las diferentes normativas nacionales han unificado los requisitos mínimos de función visual para otorgar los permisos de conducción. Sin embargo, el proceso no está completo ni adquiere la suficiente transcendencia ya que, aunque existen recomendaciones sobre el examen de parámetros de la función visual en condiciones mesópicas para la obtención del permiso de conducir, no se especifican unos niveles restrictivos concretos.

Son clásicos los estudios publicados referentes a la agudeza visual fotópica y su utilidad para caracterizar el estado de la función visual de los conductores (115, 153-155). Así como las recomendaciones realizadas por otros investigadores para incorporar otros parámetros de la función visual a este respecto (22, 152, 156, 157). Sin embargo, la ausencia de una definición clara en la evaluación de estas pruebas ha impedido, por el momento, establecer valores de corte y, consiguientemente, recomendar de forma fehaciente la inclusión de estas pruebas en los test habituales de reconocimiento de los conductores para la obtención o renovación del carnet de conducir (151, 152, 158).

Los requisitos visuales para la obtención del permiso de conducción están basados solamente en pruebas bajo condiciones fotópicas. Sin embargo, está comprobado que la agudeza visual fotópica es un predictor insuficiente para percibir estímulos y señales de tráfico durante la noche (115, 153, 159). Diversos autores han asociado el estado de la visión mesópica con la siniestralidad.

## DISCUSIÓN

Lachenmayr en 1998, fue el primero en demostrar que la disminución de la visión mesópica conlleva una mayor sensibilidad al deslumbramiento y que ambas provocan un aumento del riesgo de accidentes nocturnos (160). Además de este estudio, son muchas las investigaciones que recalcan la necesidad de valorar la función visual bajo condiciones de iluminación mesópica (96, 118, 152, 161-163). Esta recomendación aún está siendo valorada por los responsables de los distintos Estados.

Por otro lado, se sabe de la discrepancia entre los niveles de la función visual durante el día y la noche y que esto se incrementa con la edad (89, 96, 107, 131, 164). Los datos demográficos en el mundo occidental sugieren un rápido crecimiento en el número de personas mayores de 65 años, pasando a ser un segmento creciente de la población. Se espera que en los próximos 30 años la población de mayores de 65 años de EE.UU. aumente más del doble, pasando de 40,2 millones en 2010 hasta 81,2 millones en 2040 (165). Las mejores expectativas de estilo de vida, la mayor esperanza de vida y la gran actividad en este grupo de edad se convierten en un incremento de conductores mayores; población que seguirá aumentando en los próximos años. Es por ello necesario predisponer a las personas mayores a mantener en buen estado su salud visual para el desempeño de la conducción nocturna y diurna.

Las habilidades físicas y cognitivas se ven disminuidas con el paso natural de los años (96, 130, 166, 167). En consecuencia, hay una reducción de la función sensorial, cognitiva y motora; específicamente, en el ámbito de la función visual, se producen cambios paulatinos a causa del sistema óptico-ocular y factores neuronales (131, 142, 168, 169). Este hecho es relevante ya que el grupo de personas mayores de 50 años presentan una disminución de la función visual fotópica (170). Se produce un deterioro adicional de la calidad visual en condiciones de baja iluminación pudiendo presentar valores normales de AV y SC durante la conducción diurna y significativamente inferiores durante la conducción nocturna (96, 107, 130, 132, 171).

Por todo ello, en esta Tesis Doctoral se ha buscado un predictor de la agudeza visual y sensibilidad al contraste mesópicas valoradas en condiciones

fotópicas. Así se pueden evaluar las funciones visuales mesópicas, tan importantes e indispensables en la práctica de la conducción segura, en las condiciones fotópicas habituales de la clínica optométrica.

## 7.2 Análisis de los métodos de evaluación utilizados

Con respecto a la iluminación, la AV aumenta con la luminancia. Con valores inferiores a  $5 \text{ cd/m}^2$  (límite mesópico) la AV se mantiene prácticamente constante y muy baja; a partir de este nivel de iluminación, la AV mejora progresivamente hasta alcanzar un valor máximo, que se mantiene casi constante a partir de  $100 \text{ cd/m}^2$  (iluminación fotópica) (132). Estos niveles de iluminación fueron establecidos por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) en los últimos años, según se ha explicado en el apartado de introducción (23).

En este trabajo se acondicionó la sala de pruebas para conseguir los niveles de iluminación mesópico y fotópico, con unas luminancias de  $0,8 \text{ cd/m}^2$  y  $120 \text{ cd/m}^2$  respectivamente.

La condición fotópica es el nivel de iluminación habitualmente utilizado en la práctica clínica y universalmente aceptado para la determinación de los parámetros de la función visual. De hecho, el valor de iluminación seleccionado en esta Tesis Doctoral se encuentra incluido en el rango de  $80\text{-}320 \text{ cd/m}^2$ . Según Plainis et al. en el 2007 (48) y Kaiser en el 2009 (44), este rango es el recomendado en el protocolo ETDRS para la determinación de la agudeza visual, parámetro esencial en cualquier examen oftalmológico y optométrico. Se recuerda que, en esta condición, la actuación del sistema de conos y bastones está implicada.

La condición mesópica responde, fundamentalmente, a simular las condiciones de baja iluminación o iluminación de conducción nocturna. Ha sido tema de gran interés durante muchos años debido a la amplia población que realiza la tarea de conducción durante la noche. Ya en la década de los 90,

## DISCUSIÓN

autores como He en 1997 desarrolló una fórmula para establecer las funciones de eficiencia luminosa en las regiones fotópica, mesópica y escotópica de las condiciones de iluminación (172).

El nivel de luminancia mesópica seleccionado en esta Tesis Doctoral,  $0,8 \text{ cd/m}^2$ , está comprendido dentro del rango mesópico establecido por la CIE (23)  $0,005 \text{ cd/m}^2 - 5 \text{ cd/m}^2$ . Se trata, por tanto, de un nivel de iluminación bajo, pero suficientemente alto como para poder valorar los distintos parámetros de la función visual sin grandes fluctuaciones debidas a una iluminación excesivamente baja. Se recuerda que, en estas condiciones, la actuación del sistema de bastones predomina sobre el sistema de conos.

Antes de cada conjunto de pruebas en condiciones mesópicas precedidas de unas en condiciones fotópicas se aplicó un periodo de adaptación a la oscuridad de 15 minutos. En el artículo de Puell et al. 2004 (22), los autores utilizan un periodo de adaptación de, al menos, 5 minutos en base a que en el estudio de Rassow 1999 (173) éste no había encontrado diferencias entre periodos de adaptación de 5 a 15 minutos. Sin embargo, se ha preferido utilizar un tiempo en el límite superior a fin de garantizar la máxima adaptación a la oscuridad de todos los participantes.

El criterio fundamental de inclusión en este estudio ha sido presentar una agudeza visual binocular fotópica, en visión de lejos, igual o superior a 0,5 utilizando la mejor compensación óptica. Este valor de corte se ha empleado en la selección de la muestra por ser el recogido en la normativa española vigente (ver anexo 7).

Dentro del elevado número de parámetros que caracterizan la función visual, se han incluido aquellos que se han estimado, en base a lo expuesto en párrafos anteriores, más destacables para la población diana, los conductores: agudeza visual y sensibilidad al contraste, ambos valorados binocularmente.

La determinación de realizar las valoraciones de forma binocular coincide con lo realizado en estudios como Puell et al. 2004 (22, 174) al determinar los valores normales de sensibilidad al contraste en visión de lejos y en condiciones

fotópicas y mesópicas en poblaciones de más de 290 personas y, obviamente, responde a las condiciones normales de conducción (115, 153).

En el estudio llevado a cabo para esta Tesis Doctoral, para la valoración de la agudeza visual se podrían haber utilizado los optotipos tipo Snellen, ampliamente usados en la práctica clínica. Sin embargo, autores como Bailey et al. 1991 (175), McGraw et al. 1995 (176), Kaiser 2009 (44) y Shah et al. 2011 (49) advierten sobre los inconvenientes de los optotipos Snellen (progresión irregular en el tamaño de las letras, distinto número de letras en cada fila, etc.), que originan una gran variabilidad y una falta de precisión y de exactitud en las medidas. Se decidió utilizar optotipos SLOAN-ETDRS, diseñados para la escala logMAR, ya que, como informan Ricci et al. 1998 (52), Plainis et al. 2007 (48), Kaiser 2009 (44) y Shah et al. 2011 (49), se han convertido en el “patrón de oro” (*gold standard*) y su formato es el validado, estandarizado y aceptado para investigaciones clínicas por el National Eye Institute y por la Food and Drug Administration estadounidenses.

Se valoró la agudeza visual fotópica con optotipos ETDRS de diferentes contrastes (100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%), con el fin de obtener un indicador de la agudeza visual mesópica. Diversos estudios han utilizado también, test de bajo contraste para predecir y estipular diversas patologías y condiciones visuales: en 1984 Regan (retinopatía diabética, glaucoma y Parkinson) (177), en 1993 Regan (cataratas) (65), en 1997 Haegerstrom (neuritis óptica) (60), en 2003 Balcer (esclerosis múltiple) (69), y en 2004 Tanabe (queratectomía fotorrefractiva) (178).

En relación a la sensibilidad al contraste, se utilizó el test CSV-1000 retroiluminado por ser uno de los más utilizados en la práctica clínica actualmente y por permitir la valoración mesópica (179).

Con respecto a las distancias de evaluación, la agudeza visual se valoró a 4 m. Se consideró que es la distancia óptima, en base a que Kaiser 2009 refiere que es la que el National Eye Institute y la Food & Drug Administration estadounidenses exige para investigaciones clínicas (44).

## DISCUSIÓN

En todas las pruebas de la función visual se siguió el paradigma de “elección forzada” por ser el método recomendado para los tests utilizados para la determinación de cada parámetro (44).

Con objeto de encontrar un predictor fotópico de la función visual mesópica se emplearon los test de distintos contrastes (anteriormente citados para la agudeza visual) y la interposición de filtros de diferentes densidades ópticas (90%, 80% y 70%). Este hecho es coincidente, con Allen en 1999 (119), uno de los pocos estudios experimentales sobre conducción nocturna; donde evaluó como a medida que decrece la iluminación retiniana por la interposición de lentes monocromáticas, disminuye también la distancia a la que se detectan los objetos en la carretera. Con relación a las características metodológicas del estudio en sí, las dos condiciones de iluminación y las cuatro posibles situaciones (sin filtro y con filtro: 90%, 80% y 70%) constituyen las siete variables independientes del estudio. Adicionalmente, el examinador, fue siempre el mismo a fin de evitar sesgos inter-examinadores.

Las variables dependientes estuvieron constituidas por las pruebas binoculares de la función visual: agudeza visual de lejos mesópica, sensibilidad al contraste mesópica, agudeza visual fotópica sin y con la interposición de los diferentes filtros (90%, 80% y 70%) y sensibilidad al contraste fotópica. En todos los casos se aplicaron en este mismo orden. Este mismo proceder ha sido aplicado en diversos estudios (115, 180-182).

Además de ser un estudio de diseño controlado, también fue cruzado. El diseño cruzado responde a que a todos los participantes se les aplicaron todas las pruebas de la función visual seleccionadas y en todas las condiciones definidas, lo que permitió ajustar las variaciones de persona a persona, haciendo que cada participante sirviera como su propio control. Este mismo diseño ha sido aplicado por diferentes autores (170, 182).

Por último, con relación a la muestra, en el estudio participaron 56 voluntarios conductores, 30 de ellos menores de 50 años y 26 de ellos mayores de 50. Al efectuar el reclutamiento se buscó que hubiera un porcentaje similar de



menores y mayores de 50 años para evitar sesgos en función de este parámetro. Este procedimiento de segmentación de la edad en varios grupos ha sido empleado en varios estudios (115, 118, 153, 180, 183).

Con todas las características metodológicas analizadas en este apartado de la discusión se ha buscado posibilitar la comparación de unos resultados bien equilibrados y poder, así, extraer conclusiones relevantes.

### **7.3 Análisis de los resultados obtenidos**

Los dos parámetros visuales estudiados en esta Tesis Doctoral han sido la agudeza visual y la sensibilidad al contraste:

#### **7.3.1 Análisis de los resultados de la agudeza visual**

Las medidas de la agudeza visual se obtienen valorando las imágenes enfocadas en la fóvea que, como es sabido, es la zona que contiene la mayor densidad de fotorreceptores (conos). La agudeza visual es un habitual criterio psicofísico utilizado para medir el error refractivo y determinar la prescripción optométrica para su compensación. Así como para valorar el estado básico de la función visual de conductores de vehículos (184).

En los siguientes párrafos de esta discusión, se analiza la AV estática en condiciones de iluminación variable. Tradicionalmente la determinación de la AV estática ha sido utilizada como medida de la habilidad del sistema visual para resolver objetos en ambientes bien iluminados (153, 185). En la mayoría de los países del mundo desarrollado, se establecen los test de determinación de la AV estática como predictor del estado de la función visual y son utilizados como valor restrictivo en el examen que posibilita el acceso al permiso para conducir vehículos. En esta Tesis Doctoral el valor de la agudeza visual fotópica para el total de la muestra ha sido de  $-0,06 \pm 0,06$  log MAR, este valor es similar al obtenido por autores como Arditi et al. 1996 (186), Norton et al. 2002 (67), Pardhan et al. 2004 (168), Hiraoka et al. 2008 (187), Haughom et al. 2011 (188) y Lin et al. 2015 (189).

## DISCUSIÓN

Hace pocos años se ha recomendado la incorporación de la valoración de la AV mesópica en las pruebas de reconocimiento médico para la conducción de vehículos. Esta recomendación aún está siendo valorada por los responsables de los distintos Estados (96, 141). El proceso no está completo ni adquiere la suficiente transcendencia ya que, aunque existen recomendaciones sobre el examen de parámetros de la función visual en condiciones mesópicas para la obtención del permiso de conducir, no se especifican unos niveles restrictivos concretos. En la práctica, en la mayoría de los países, se continúa tomando los valores de la AV fotópica como referencia del estado de la función visual.

Se considera de importante aplicación, la medida de la AV en conducción diurna y nocturna de vehículos, por ser ésta una tarea a desarrollar por amplias poblaciones durante largos periodos de tiempo y que entraña un elevado riesgo para la integridad física de las personas.

Como se ha discutido con anterioridad, el proceso natural de envejecimiento produce una disminución de la función visual (96, 130, 166). En este estudio, para todas las condiciones de evaluación se observaron valores significativamente peores de AV en los participantes más mayores, en comparación con el grupo de personas de menor edad. En concreto una diferencia del 30% para AV mesópica de contraste 100% y diferencias del 15-41% para AVF fotópica de optotipos de diferentes contrastes. Estos valores son coincidentes a los obtenidos por Wood en 2005 (115), Gruber en 2013 (96) y Birren en 1950 (190). Este hecho es relevante ya que el grupo de personas mayores de 50 años, debido a la edad, presenta una disminución de agudeza visual fotópica y también se produce un deterioro adicional de la calidad visual en condiciones de baja iluminación; pudiendo presentar valores normales de AV durante la conducción diurna y significativamente inferiores durante la conducción nocturna.

Los participantes de mayor edad presentaron una disminución más pronunciada de la AV debida a las bajas condiciones de iluminación. Concretamente, esta disminución fue del 8% en las personas de menos de 50 años y del 24% para los mayores de 50 años. Estos resultados son similares a

los obtenidos por Sivack en 1981 quien realizó uno de los primeros estudios que relaciona la AV mesópica y la edad. Comparó en un entorno de conducción real, la legibilidad de las señales de autopista en visión nocturna entre jóvenes y personas mayores obteniendo como resultado que la distancia de legibilidad en los participantes mayores fue entre un 23% y un 35% superior a la de los jóvenes (191).

En el trabajo de esta Tesis Doctoral se han obtenido para la AV mesópica valores promedio de  $0,01 \pm 0,12$  para el total de la muestra,  $-0,06 \pm 0,06$  para personas menores de 50 años y  $0,09 \pm 0,11$  para personas mayores de 50 años, correspondientes con  $0,98 \pm 0,27$ ;  $1,15 \pm 0,15$  y  $0,81 \pm 0,25$ , respectivamente en escala decimal; es decir, se observan valores de AV mesópica significativamente peores en el grupo de mayor edad. La transformación a escala decimal se realiza para la mejor comprensión de esta discusión al comparar los resultados con trabajos clásicos que utilizan la AV decimal. Estos datos son semejantes a los publicados en 1998 por Mehra, en los que sus resultados de AV oscilaron entre 0,51 y 0,83 en función del nivel de iluminación mesópico cuyo intervalo estuvo comprendido entre los valores de  $0,045 \text{ cd/m}^2$  y  $0,12 \text{ cd/m}^2$ , respectivamente (192). Además son similares a los obtenidos por diversos autores en condiciones de iluminación mesópica como los trabajos de Puell realizado en 2004 (22), Arumi et al. en 1997 (127), Pesudovs et al. en 2004 (193), García Lázaro et al. en 2013 (194) y Lin et al. en 2015 (189). Si bien otros autores informan de unos valores distintos, éstos fueron determinados con un nivel de iluminación mesópico distinto al de este estudio.

La relación entre la AV medida en diferentes niveles de iluminación y la edad fue demostrada, ya en 1955 por Frisen (195), en 1966 por Burg (196), y en 1982 por Pitts (197). Todos ellos indicaron una pérdida de visión más acentuada por la edad a partir de 60 años. Son también destacables, los trabajos de Leibowitz en 1977 (114), Sivack en 1981 (191) y Sturgis en 1982 (159) sobre degradación visual y conducción nocturna. Asimismo, existen trabajos de interés que atienden a la combinación de las tres variables a considerar: AV, nivel de iluminación y edad. El clásico estudio de Forbes en 1969 encontró sólo pequeñas

## DISCUSIÓN

diferencias entre estas tres variables (198), pero los posteriores trabajos realizados por Richards en 1977 y Sturgis en 1982 demostraron una importante pérdida de AV al decrecer la iluminación en función de la edad indicando que los declives continuos en la AV son mayores cuanto más cerca se encuentra la iluminación ambiente de los niveles escotópicos (98, 107, 159).

Por todo ello, a partir de estos estudios se establece que la valoración de la AV en diferentes niveles de iluminación y/o contraste es imprescindible para la evaluación de las capacidades de aptitud requeridas para la obtención del permiso de conducción.

Por otro lado, en esta discusión conviene recordar que los diferentes niveles de luminancia, en una sala de pruebas, se pueden conseguir mediante filtros neutros de distinta densidad óptica. La luminancia del test visto a través de un filtro puede calcularse según la expresión (2):

$$L = L_0 \times T$$

Siendo en este caso: L la luminancia mesópica ( $0,8 \text{ cd/m}^2$ ),  $L_0$  la luminancia fotópica ( $120 \text{ cd/m}^2$ ); resulta una transmitancia de filtro (T) de 0,007. Esto implica un porcentaje de transmisión de filtro del 0,7% y una absorción del 99,3%. El filtro teórico obtenido para simular condiciones de iluminación mesópica, sería un filtro excesivamente oscuro, donde apenas se podría conseguir ver. Por esta razón, en esta Tesis Doctoral se ha buscado la combinación entre filtros de diferentes densidades ópticas (90%, 80% y 70%) con test de AV de diferente contraste (100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%) con el fin de buscar el mejor predictor mesópico.

La mejor composición fue la siguiente: el optotipo de **contraste 20%** y la interposición del **filtro de 80%** para el total de la muestra. La AV fotópica resultante de esta composición es de:  $0,01 \pm 0,11$ ; muy similar a la mesópica  $0,01 \pm 0,12$ . Existe una relación alta entre las medidas, con un coeficiente de correlación de Pearson de 0,86 y un alto índice de correlación intraclase (ICC) 0,86. Además, se realizó un gráfico Bland-Altman para valorar la diferencia de las medias entre la media de las dos medidas. Se puede observar que están

vinculadas debido a que no hay puntos extremos en la gráfica y estos presentan una distribución homogénea.

Este mismo proceso se realizó segmentando la muestra en menores y mayores de 50 años. Los resultados obtenidos se mostraron en este mismo documento, en el apartado correspondiente. En el caso de los menores de 50 no hay una gran relación entre las medidas, debido a un ICC bajo de 0,50. Esto no es así en el caso de los mayores de 50 con un ICC alto de 0,82. Se observa que, pese a la baja relación en el grupo de menores de 50, es el filtro de 80% y contraste 20% el mejor predictor en ambos grupos, como en el total de la muestra. Estos resultados son interesantes e inducen a diseñar nuevas investigaciones con tamaños muestrales muy amplios. En consecuencia, la mejor combinación predictora de la AV mesópica es la resultante de la interposición del **filtro de 80%** y un test de AV del **20% de contraste Weber**.

### 7.3.2 Análisis de los resultados de la sensibilidad al contraste

Diversos estudios han demostrado que la agudeza visual por sí sola, no es idónea para valorar la respuesta del sistema visual en condiciones de baja iluminación o mesópica (115, 127, 148, 158). Esta situación se agrava en personas con cataratas (199-201) o con degeneración macular asociada a la edad (71, 202, 203); donde la sensibilidad al contraste puede estar más implicada que la agudeza visual.

Un estudio multicéntrico (desarrollado en diferentes países europeos) en el 2011, evaluó a 2.422 individuos, realizando cinco pruebas optométricas: agudeza visual, campo visual, sensibilidad al contraste, deslumbramiento y campo visual útil. Demostró que pruebas como la sensibilidad al contraste, deslumbramiento y campo visual útil evalúan mejor la capacidad para conducir que otras pruebas como la de agudeza visual (152).

Muchas investigaciones han promovido una normativa de valores estándares de sensibilidad al contraste fotópica; destacan por su iniciativa y su importancia los dos trabajos pioneros de Elliott realizados en 1990 y 1992 (64,

## DISCUSIÓN

204). Con estas investigaciones los autores sientan las bases para el uso en la valoración clínica del test Pelli Robson para la evaluación de la sensibilidad al contraste. Posteriormente, las investigaciones de Lovie Kitchin en el 2000 insisten en el estudio de la repetibilidad de los resultados en las pruebas profundizando en la relación con otros test estándares, como el CSV-1000, que valoran esta misma variable relacionando sus resultados con la edad de los individuos estudiados (205). Otros estudios realizados en condiciones de iluminación fotópica como el de Mäntyjärvi en 2001 son también de interés, por su practicidad (206).

Las medidas de sensibilidad al contraste en esta Tesis Doctoral se tomaron mediante el CSV-1000 para las siguientes frecuencias espaciales: 3,6, 8 y 12 cpv.

En condiciones de iluminación fotópica se obtuvieron unos resultados para el total de la muestra de:  $1,95 \pm 0,12$ ;  $2,10 \pm 0,26$ ;  $1,76 \pm 0,28$ ;  $1,28 \pm 0,30$  y para iluminación mesópica de  $1,84 \pm 0,18$ ;  $2,05 \pm 0,24$ ;  $1,70 \pm 0,34$ ;  $1,19 \pm 0,35$  para 3, 6, 8 y 12 cpv, respectivamente. Estos resultados son concordantes con los proporcionados con el fabricante (207).

Como en el resto de este documento, la edad se ha considerado un factor determinante en los resultados. El proceso natural de envejecimiento, entre otros efectos, influye en una pérdida de sensibilidad al contraste y una mayor sensibilidad al deslumbramiento como resultado de una progresiva opacidad del cristalino. Considerándose estos parámetros de la función visual especialmente sensibles en la conducción segura (22, 73, 208, 209).

En este estudio, con respecto a la **edad**, en condiciones de iluminación **fotópica** se obtuvieron unos valores de:

-Para los menores de 50 años:  $1,99 \pm 0,09$ ;  $2,22 \pm 0,12$ ;  $1,87 \pm 0,14$  y  $1,44 \pm 0,17$  para 3, 6, 12 y 18 cpv respectivamente.

-Para los mayores de 50 años:  $1,92 \pm 0,14$ ;  $1,96 \pm 0,31$ ;  $1,64 \pm 0,35$  y  $1,09 \pm 0,31$  para 3,6,12 y 18 cpv respectivamente.

Estos valores son similares a los publicados por diversos autores como: Anderson en 1995 (199), Derefeldt en 1979 (210), Wachler en 1998 (211) y Pomerance en 1994 (85). Éste último, estudió la sensibilidad al contraste con unos rangos de edad comprendidos entre los 20-55 años y 56-75 años. Los resultados que obtuvo presentan leves diferencias entre sus datos y los obtenidos en esta Tesis Doctoral, que pueden ser debido al diferente rango de edades considerado.

Además, los valores obtenidos en esta Tesis Doctoral en el grupo de menores de 50 años son semejantes a los de Vilhelm en 2015 (179). Su rango de edad estaba comprendido en 18-25 años con un nivel de iluminación fotópico de 85 cd/m<sup>2</sup>:  $1,93 \pm 0,45$ ;  $2,14 \pm 0,59$ ;  $1,84 \pm 0,91$  y  $1,25 \pm 0,91$  para 3, 6, 12 y 18 cpg respectivamente.

En condiciones de iluminación **mesópica**, los valores obtenidos en esta Tesis con respecto a la edad, presentados en el apartado de resultados, son similares a los obtenidos por Rassow en 1999 (173), Sloane en 1988 (212) (213) y Pomerance en 1994 (85). Éste último para un rango de edades de 50 a 75 años. Al igual que para condiciones de iluminación fotópica las diferencias obtenidas pueden ser debidas a los distintos rangos de edad elegidos.

Para las frecuencias espaciales de 6, 8 y 12 cpg, en los dos niveles de iluminación hay diferencias estadísticamente significativas entre el grupo de menores y mayores de 50 años. Esto no es así para la frecuencia espacial de 3 cpg. Estos resultados son concordantes con los consultados en diversos estudios. (71, 85, 204).

Es necesario recordar, para su mejor comprensión que, el sistema visual humano presenta su máxima sensibilidad al contraste para las frecuencias espaciales intermedias entre 6 cpg y 10 cpg de ángulo visual. Las primeras valoraciones de la función de sensibilidad al contraste realizadas por Ginsburg en 1983 mediante el uso de ondas sinusoidales de diferente frecuencia espacial; ya demostraron este hecho, que se ha venido repitiendo en la práctica totalidad de los estudios realizados sobre la función de sensibilidad al contraste (87). Los

## DISCUSIÓN

resultados de esta Tesis Doctoral son francamente coincidentes con estos estudios, ya que los máximos valores de sensibilidad al contraste se han presentado para la frecuencia espacial de 6 cpg.

Por otro lado, la sensibilidad al contraste mesópica de frecuencia 18 cpg mostró los valores más bajos del estudio para todas las edades. Este hecho es completamente acorde con la anatomía y función del sistema visual humano sano; que en niveles de baja iluminación no puede responder a estímulos que requieran alta resolución como es el caso de las frecuencias espaciales altas de 18 cpg. Para conseguir una percepción adecuada de estas frecuencias espaciales deberían estar activados los fotorreceptores conos que son los que permiten la alta resolución espacial y que se encuentran concentrados en las zonas centrales de la retina. En condiciones de baja iluminación, como es sabido, los fotorreceptores activados son los bastones que presentan una alta densidad en las zonas paracentrales y que posibilitan la visión nocturna (2).

Los resultados obtenidos de sensibilidad al contraste en esta Tesis Doctoral, para todas las frecuencias espaciales han disminuido según ha descendido el nivel de iluminación ambiente de fotópico a mesópico. Este hecho es coincidente con la mayoría de los estudios por lo que se resalta la importancia de la valoración de la sensibilidad al contraste en condiciones de baja iluminación para la conducción nocturna (76, 115, 118, 142, 180, 214). Debido a ello, como objetivo principal de este estudio se buscó el mejor predictor fotópico de la sensibilidad al contraste en condiciones mesópicas. Un buen predictor de la SC mesópica, resulta de la interposición de un **filtro del 70%** para las frecuencias espaciales de **6, 12 y 18 cpg** y un **filtro del 90%** para **3 cpg**.

Existe una relación alta entre las medidas, con un coeficiente de correlación de Pearson elevado para todas las frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg): 0,6, 0,69, 0,74 y 0,74 respectivamente. Además, se realizó un gráfico Bland-Altman para valorar la diferencia de las medias entre la media de las dos medidas. Se puede observar, en las gráficas correspondientes, que están vinculadas debido a que no hay puntos extremos en la gráfica y estos presentan una distribución homogénea.



Este mismo proceso se realizó segmentando la muestra en menores y mayores de 50 años. Los resultados obtenidos se mostraron en este mismo documento, en el apartado correspondiente. En el caso de los menores de 50 no hay una gran relación entre las medidas, debido a unos ICC bajos para casi todas las frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg): 0,67, 0,06, 0,56, 0,27 respectivamente. Esto no es así en el caso de los mayores de 50 con unos ICC altos, para la mayoría de las frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg): 0,36, 0,65, 0,70 y 0,70 respectivamente. Se observa que, pese a la baja relación en el grupo de menores de 50, para las frecuencias espaciales de 3 y 18 cpg son los filtros de 90% y 70% los mejores predictores en ambos grupos, como en el total de la muestra. Estos resultados son interesantes e inducen a diseñar nuevas investigaciones con tamaños muestrales más amplios. En consecuencia, la mejor combinación predictora de la SC mesópica es la resultante de la interposición del **filtro de 70%** para las frecuencias de **6, 12 y 18 cpg** y del filtro de **90%** para la frecuencia de **3 cpg**.

La principal aportación de esta Tesis Doctoral es valorar la función visual en condiciones de iluminación semejantes a las reales en la conducción nocturna, sin acondicionar los centros de reconocimiento para la obtención del permiso de conducir utilizando el método de simulación con dos herramientas: la interposición de filtros de diferente absorción y la disminución de contraste de los optotipos en los paneles de evaluación, tanto para la AV como para la función de SC. En esta investigación se ha planteado un sistema práctico y económico de valoración de la AV y SC mesópicas, que sólo requiere el cambio del contraste de los optotipos actualmente utilizados y la incorporación de filtros ópticos de diferentes densidades ópticas. Los resultados de este trabajo muestran que el uso de optotipos de **contraste 20%** y la interposición de un **filtro de absorción del 80%** en condiciones fotópicas proporcionan valores de **AV** similares a las condiciones de iluminación mesópicas; pudiendo ser utilizado como sistema de valoración de la AV mesópica en los centros de reconocimiento de conductores. En el caso de la **sensibilidad al contraste**, la interposición de un filtro de absorción del **70%** (para las frecuencias espaciales de 6,12 y 18 cpg) y de **90%**

## DISCUSIÓN

(para la frecuencia espacial de 3 cpg) en condiciones fotópicas, son buenos predictores de la sensibilidad al contraste mesópica.

# CONCLUSIONES

---



## 8 CONCLUSIONES

Las conclusiones extraídas de la valoración de los resultados de la función visual binocular estudiados son las siguientes:

1. Los valores medios obtenidos de la agudeza visual mesópica de contraste 100% han sido los esperados dentro de los rangos de normalidad para esta condición lumínica.
2. La agudeza visual fotópica se reduce significativamente a medida que disminuye el contraste de optotipo.
3. La agudeza visual fotópica disminuye significativamente al aumentar la densidad óptica de los filtros.
4. Existen correlaciones entre las agudezas visuales fotópicas para diferentes contrastes sin y con interposición de filtros, con la agudeza visual del 100% de contraste valorada en condiciones mesópicas.
5. En condiciones de iluminación fotópica, el uso de optotipos de contraste del 20% junto con la interposición de filtros del 80%, permite valorar la agudeza visual mesópica.
6. Los valores obtenidos de sensibilidad al contraste mesópica están dentro de los rangos de normalidad. El máximo de sensibilidad al contraste fue para frecuencias espaciales de 6 cpg.
7. La sensibilidad al contraste fotópica se ve significativamente comprometida al interponer cualquiera de los filtros, siendo el efecto progresivamente mayor según aumenta la frecuencia espacial y la densidad óptica de los filtros.
8. El empleo de filtros del 90% y del 70% para la evaluación de la sensibilidad al contraste fotópica, posibilita conocer el estado de la sensibilidad al contraste mesópica.
9. La edad es un factor determinante en los valores de agudeza visual y sensibilidad al contraste, siendo peor al aumentar la edad.
10. En menores de 50 años, los predictores fotópicos para la agudeza visual mesópica son el test ETDRS de contraste Weber del 20%

## CONCLUSIONES

combinado con la interposición del filtro de 80% y el test ETDRS de contraste Weber del 100% combinado con la interposición del filtro de 90%.

11. En mayores de 50 años, el predictor fotópico para la agudeza visual mesópica es el test ETDRS de contraste Weber del 20% combinado con la interposición del filtro de 80%.
12. El mejor predictor para la determinación de la agudeza visual mesópica en ambiente fotópico, para cualquier rango de edad, es el test ETDRS de contraste Weber del 20% combinado la interposición del filtro de densidad óptica neutra del 80%.
13. En menores de 50 años, en función de las frecuencias espaciales, el predictor requiere filtros de diferentes absorciones, siendo concretamente el filtro del 90% para 3 cpg, filtro del 80% para 6 cpg, sin filtro para 12 cpg y filtro del 70% para 18 cpg.
14. En mayores de 50 años, en función de las frecuencias espaciales, el predictor requiere filtros de diferentes absorciones, siendo concretamente el filtro del 90% para 3 cpg y el filtro del 70% para 6 cpg, 12 cpg y 18 cpg.
15. Para tener un predictor fotópico de la sensibilidad contraste mesópica es necesario el diseño y desarrollo de un dispositivo que incluya los filtros del 0%, del 70%, del 80% y del 90% para seleccionar el filtro adecuado en función de la edad y de la frecuencia espacial.

## BIBLIOGRAFÍA

---





## 9 BIBLIOGRAFÍA

1. Sengupta DL, Sarkar TK. Maxwell, Hertz, the Maxwellians, and the early history of electromagnetic waves. *IEEE Antennas and propagation magazine*. 2003;45(2):13-9.
2. Artigas J. *Óptica Fisiológica: Psicofísica de la visión*: McGraw-Hill/Interamericana de España; 1995.
3. Vigil JMS. *Calpe: paradigma editorial, 1918-1925*: Ediciones Trea; 2005.
4. Iqbal M. *An introduction to solar radiation*: Elsevier; 2012.
5. Perez-Gomez B, Pollan M, Gustavsson P, Plato N, Aragonés N, López-Abente G. Cutaneous melanoma: hints from occupational risks by anatomic site in Swedish men. *Occupational and environmental medicine*. 2004;61(2):117-26.
6. Young AR. Acute effects of UVR on human eyes and skin. *Progress in biophysics and molecular biology*. 2006;92(1):80-5.
7. Soffritti M, Tibaldi E, Bua L, Padovani M, Falcioni L, Lauriola M, et al. Life-span carcinogenicity studies on Sprague–Dawley rats exposed to  $\gamma$ -radiation: Design of the project and report on the tumor occurrence after post-natal radiation exposure (6 weeks of age) delivered in a single acute exposure. *American journal of industrial medicine*. 2015;58(1):46-60.
8. Sánchez-Ramos Roda C. *Filtros ópticos contra el efecto fototóxico del espectro visible en la retina: experimentación animal*: [SI]:[sn], 2010; 2010.
9. Moseley H. *Non-ionising Radiation: microwaves, ultraviolet and laser radiation*: Hilger; 1988.
10. Palmer JM, Grant BG. *The art of radiometry*: SPIE Press Bellingham, WA, USA; 2010.
11. Segura JL, editor *Dispositivos orgánicos electroluminiscentes. Una nueva tecnología*. *Anales de la Real Sociedad Española de Química*; 1999.
12. Schreuder D. *Outdoor lighting: physics, vision and perception*: Springer; 2008.
13. Zwinkels JC, Ikonen E, Fox NP, Ulm G, Rastello ML. Photometry, radiometry and ‘the candela’: evolution in the classical and quantum world. *Metrologia*. 2010;47(5):R15.
14. McCluney WR. *Introduction to radiometry and photometry*: Artech House; 2014.
15. Kanski JJ. *Atlas de autoevaluación en oftalmología*: Elsevier España; 2009.
16. Maurice D. The transparency of the corneal stroma. *Vision research*. 1970;10(1):107-8.
17. Polyak SL. *The retina*: JSTOR; 1941.

## BIBLIOGRAFÍA

18. Snowden R, Snowden RJ, Thompson P, Troscianko T. Basic vision: an introduction to visual perception: Oxford University Press; 2012.
19. Walkey H, Barbur J. Guest editorial: Shedding new light on the twilight zone. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2006;26(3):223-4.
20. Kvangsakul J, Rodriguez-Carmona M, Edgar DF, Barker FM, Koëpcke W, Schalch W, et al. Supplementation with the carotenoids lutein or zeaxanthin improves human visual performance. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2006;26(4):362-71.
21. Barbur JL. Reaction-time determination of the latency between visual signals generated by rods and cones. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 1982;2(3):179-85.
22. Puell MC, Palomo C, Sánchez-Ramos C, Villena C. Mesopic contrast sensitivity in the presence or absence of glare in a large driver population. *Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*. 2004;42(9):755-61.
23. (CIE) CIE. Recommended systema for mesopic photometry based on visual performance.; 2010.
24. Colvard M. Defining mesopic and scotopic. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2003;29(1):6-7.
25. Viikari M, Ekrias A, Eloholma M, Halonen L. Modeling spectral sensitivity at low light levels based on mesopic visual performance. *Clinical ophthalmology (Auckland, NZ)*. 2008;2(1):173.
26. Stiles GWWS. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, 2nd Edition. 2000.
27. Werner JS, Steele VG. Sensitivity of human foveal color mechanisms throughout the life span. *JOSA A*. 1988;5(12):2122-30.
28. Yuodelis C, Hendrickson A. A qualitative and quantitative analysis of the human fovea during development. *Vision research*. 1986;26(6):847-55.
29. Balazsi A, Rootman J, Drance S, Schulzer M, Douglas G. The effect of age on the nerve fiber population of the human optic nerve. *American journal of ophthalmology*. 1984;97(6):760-6.
30. Marshall J, Grindle J, Ansell P, Borwein B. Convolution in human rods: an ageing process. *British Journal of Ophthalmology*. 1979;63(3):181-7.
31. Weale R. Age and the transmittance of the human crystalline lens. *The Journal of physiology*. 1988;395(1):577-87.
32. (CIE) CIE. Standard spectral luminous efficiency function V. 1924.
33. (CIE) CIE. Scotopic luminosity curve. International Commission on illumination; 1951.
34. Yendrikhovskij SN, Blommaert F, De Ridder H. Color reproduction and the naturalness constraint. *Color Research & Application: Endorsed by Inter-Society Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for*

- the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Français de la Couleur. 1999;24(1):52-67.
35. Rodríguez Guzmán D, Zúñiga López A, Suaste Gómez E. Respuestas pupilares a estímulos cromáticos en el espectro de 400 nm a 650 nm, en el estado estable. *Revista mexicana de física*. 2005;51(4):365-70.
  36. Rains GD, Campos V. Principios de neuropsicología humana: McGraw-Hill México; 2004.
  37. Smith G, Atchison DA. The eye and visual optical instruments. Edition en anglais: Cambridge University Press; 1997.
  38. Benjamin WJ. Borish's Clinical Refraction-E-Book: Elsevier Health Sciences; 2006.
  39. Martín R, Vecilla G. Manual de optometría. Madrid: Editorial Médica Panamericana. 2011.
  40. Bailey IL, Lovie JE. New design principles for visual acuity letter charts. *American journal of optometry and physiological optics*. 1976;53(11):740-5.
  41. Westheimer G. Scaling of visual acuity measurements. *Arch Ophthalmol*. 1979;97(2):327-30.
  42. Taylor HR. Applying new design principles to the construction of an illiterate E chart. *American journal of optometry and physiological optics*. 1978;55(5):348-51.
  43. Ferris FL, 3rd, Kassoff A, Bresnick GH, Bailey I. New visual acuity charts for clinical research. *Am J Ophthalmol*. 1982;94(1):91-6.
  44. Kaiser PK. Prospective evaluation of visual acuity assessment: a comparison of snellen versus ETDRS charts in clinical practice (An AOS Thesis). *Transactions of the American Ophthalmological Society*. 2009;107:311.
  45. Kniestedt C, Stamper RL. Visual acuity and its measurement. *Ophthalmology Clinics of North America*. 2003;16(2):155-70, v.
  46. Camparini M, Cassinari P, Ferrigno L, Macaluso C. ETDRS-fast: implementing psychophysical adaptive methods to standardized visual acuity measurement with ETDRS charts. *Investigative ophthalmology & visual science*. 2001;42(6):1226-31.
  47. Laidlaw D, Abbott A, Rosser D. Development of a clinically feasible logMAR alternative to the Snellen chart: performance of the "compact reduced logMAR" visual acuity chart in amblyopic children. *British journal of ophthalmology*. 2003;87(10):1232-4.
  48. Plainis S, Tzatzala P, Orphanos Y, Tsilimbaris MK. A modified ETDRS visual acuity chart for European-wide use. *Optometry and vision science*. 2007;84(7):647-53.
  49. Shah N, Dakin SC, Redmond T, Anderson RS. Vanishing optotype acuity: repeatability and effect of the number of alternatives. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2011;31(1):17-22.

## BIBLIOGRAFÍA

50. Woo G, Lo P. A Chinese word acuity chart with new design principles. *Singapore Med J*. 1980;21(5):689-92.
51. Atchison DA, Smith G, Efron N. The effect of pupil size on visual acuity in uncorrected and corrected myopia. *American journal of optometry and physiological optics*. 1979;56(5):315-23.
52. Ricci F, Cedrone C, Cerulli L. Standardized measurement of visual acuity. *Ophthalmic epidemiology*. 1998;5(1):41-53.
53. Gutiérrez M, Aparicio J, Menéndez J, Matesanz B, Arranz I, Vizmanos J, et al. Invariancia de la sensibilidad al contraste frente a cambios en la luminancia de entorno. *Óptica pura y aplicada*. 2008;41:1-7.
54. Bowers AR, Luo G, Rensing NM, Peli E. Evaluation of a prototype Minified Augmented-View device for patients with impaired night vision. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2004;24(4):296-312.
55. Herse PR, Bedell HE. Contrast sensitivity for letter and grating targets under various stimulus conditions. *Optometry and vision science: official publication of the American Academy of Optometry*. 1989;66(11):774-81.
56. Solans Barri T, García Sánchez J, Cárcelos Cárcelos J, Martínez Puente A, Rodríguez Hernández J, Martín-F LE. Refracción ocular y baja visión. *Sociedad Española de Oftalmología Madrid*. 2003:259-61.
57. Larrosa Expósito M. Influencia de los niveles de iluminación en el gabinete optométrico en los resultados de la medida de la Agudeza Visual: *Universitat Politècnica de Catalunya*; 2015.
58. Regan D, Neima D. Low-contrast letter charts as a test of visual function. *Ophthalmology*. 1983;90(10):1192-200.
59. Bailey I. Simplifying contrast sensitivity testing. *Am J Optom Physiol Opt*. 1982;59:12.
60. Haegerstrom-Portnoy G, Brabyn J, Schneck ME, Jampolsky A. The skill card. An acuity test of reduced luminance and contrast. *Smith-Kettlewell Institute Low Luminance. Investigative ophthalmology & visual science*. 1997;38(1):207-18.
61. Guillon M, Lydon DP, Solman RT. Effect of target contrast and luminance on soft contact lens and spectacle visual performance. *Current eye research*. 1988;7(7):635-48.
62. Bailey MD, Walline JJ, Mitchell GL, Zadnik K. Visual acuity in contact lens wearers. *Optometry and vision science*. 2001;78(10):726-31.
63. Woods RL, Saunders JE, Port M. Optical performance of decentered bifocal contact lenses. *Optometry and vision science: official publication of the American Academy of Optometry*. 1993;70(3):171-84.
64. Elliott DB, Bullimore MA. Assessing the reliability, discriminative ability, and validity of disability glare tests. *Investigative ophthalmology & visual science*. 1993;34(1):108-19.

65. Regan D, Giaschi D, Fresco B. Measurement of glare sensitivity in cataract patients using low-contrast letter charts. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 1993;13(2):115-23.
66. Lord SR, Clark RD, Webster IW. Visual acuity and contrast sensitivity in relation to falls in an elderly population. *Age Ageing*. 1991;20(3):175-81.
67. Norton TT, Corliss DA, Bailey JE. The psychophysical measurement of visual function: Butterworth-Heinemann Woburn; 2002.
68. Lynch DR, Farmer JM, Rochestie D, Balcer LJ. Contrast letter acuity as a measure of visual dysfunction in patients with Friedreich ataxia. *Journal of neuro-ophthalmology*. 2002;22(4):270-4.
69. Balcer L, Baier M, Cohen J, Kooijmans M, Sandrock A, Nano-Schiavi M, et al. Contrast letter acuity as a visual component for the Multiple Sclerosis Functional Composite. *Neurology*. 2003;61(10):1367-73.
70. Akin T, Karadayi K, Aykan U, Certel I, Bilge AH. The effects of artificial tear application on contrast sensitivity in dry and normal eyes. *European journal of ophthalmology*. 2006;16(6):785-90.
71. Puell MC, Barrio AR, Palomo-Alvarez C, Gómez-Sanz FJ, Clement-Corral A, Pérez-Carrasco MJ. Impaired mesopic visual acuity in eyes with early age-related macular degeneration. *Investigative ophthalmology & visual science*. 2012;53(11):7310-4.
72. Owsley C, Sloane ME. Contrast sensitivity, acuity, and the perception of 'real-world' targets. *British Journal of Ophthalmology*. 1987;71(10):791-6.
73. Koch DD, Liu JF. Survey of the clinical use of glare and contrast sensitivity testing. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 1990;16(6):707-11.
74. Ginsburg AP. A new contrast sensitivity vision test chart. *American journal of optometry and physiological optics*. 1984;61(6):403-7.
75. Marmor MF. Contrast sensitivity versus visual acuity in retinal disease. *British Journal of Ophthalmology*. 1986;70(7):553-9.
76. Bühren J, Terzi E, Bach M, Wesemann W, Kohnen T. Measuring contrast sensitivity under different lighting conditions: comparison of three tests. *Optometry and vision science*. 2006;83(5):290-8.
77. Oshika T, Okamoto C, Samejima T, Tokunaga T, Miyata K. Contrast sensitivity function and ocular higher-order wavefront aberrations in normal human eyes. *Ophthalmology*. 2006;113(10):1807-12.
78. Perez Carrasco M. Efecto de un filtro amarillo sobre la función visual mesópica de sujetos emétopes y sujetos miopes operados de cirugía refractiva lasik. Facultad de Ciencias y Físicas Departamento de Óptica: Universidad Complutense de Madrid; 2006.
79. Bouma H. Visual recognition of isolated lower-case letters. *Vision Research*. 1971;11(5):459-74.
80. Campbell FW, Robson J. Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. *The Journal of physiology*. 1968;197(3):551-66.

## BIBLIOGRAFÍA

81. Colombo E, Issolio L, Santillan J, Aguirre R. What characteristics a clinical CSF system has to have? *Optica Applicata*. 2009;39(2).
82. Owsley C, Sekuler R, Siemsen D. Contrast sensitivity throughout adulthood. *Vision research*. 1983;23(7):689-99.
83. Robson J. Spatial and temporal contrast-sensitivity functions of the visual system. *Josa*. 1966;56(8):1141-2.
84. Stamper RL, Hsu-Winges C, Sopher M. Arden contrast sensitivity testing in glaucoma. *Archives of Ophthalmology*. 1982;100(6):947-50.
85. Pomerance GN, Evans DW. Test-retest reliability of the CSV-1000 contrast test and its relationship to glaucoma therapy. *Investigative ophthalmology & visual science*. 1994;35(9):3357-61.
86. Álvarez AL, Estrada J, del Pilar Quiroz D, Bedoya DM. Fiabilidad del CSV 1000 para evaluar la función de sensibilidad al contraste en infantes entre los siete y diez años. *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular*. 2010;8(1):19-28.
87. Ginsburg AP, Cannon MW. Comparison of three methods for rapid determination of threshold contrast sensitivity. *Investigative ophthalmology & visual science*. 1983;24(6):798-802.
88. Woo G, Bohnsack H. Comparison of the distance and near Vistech vision contrast test systems (VCTS). *Can J Optom*. 1986;48:12-5.
89. Andersen GJ. Aging and vision: changes in function and performance from optics to perception. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*. 2012;3(3):403-10.
90. Enoch JM, Werner JS, Haegerstrom-Portnoy G, Lakshminarayanan V, Rynders M. Forever young: visual functions not affected or minimally affected by aging: a review. *Journals of Gerontology Series A: Biomedical Sciences and Medical Sciences*. 1999;54(8):B336-B51.
91. Kaur J, Kukreja S, Kaur A, Malhotra N, Kaur R. The oxidative stress in cataract patients. *Journal of clinical and diagnostic research: JCDR*. 2012;6(10):1629.
92. Petrash JM. Aging and age-related diseases of the ocular lens and vitreous body. *Investigative ophthalmology & visual science*. 2013;54(14):ORSF54-ORSF9.
93. Prokofyeva E, Wegener A, Zrenner E. Cataract prevalence and prevention in Europe: a literature review. *Acta Ophthalmologica*. 2013;91(5):395-405.
94. Curcio C, Millican C, Allen K, Kalina R. Aging of the human photoreceptor mosaic: evidence for selective vulnerability of rods in central retina. *Investigative ophthalmology & visual science*. 1993;34(12):3278-96.
95. Oshika T, Klyce SD, Applegate RA, Howland HC. Changes in corneal wavefront aberrations with aging. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 1999;40(7):1351-5.
96. Gruber N, Mosimann UP, Müri RM, Nef T. Vision and night driving abilities of elderly drivers. *Traffic Inj Prev*. 2013;14(5):477-85.

97. Nischler C, Michael R, Wintersteller C, Marvan P, Emesz M, Van Rijn LJ, et al. Cataract and pseudophakia in elderly European drivers. *European journal of ophthalmology*. 2010;20(5):892-901.
98. Richards OW. Effects of luminance and contrast on visual acuity, ages 16 to 90 years. *Optometry & Vision Science*. 1977;54(3):178-84.
99. Petzold A, Plant GT. Clinical disorders affecting mesopic vision. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2006;26(3):326-41.
100. Sekuler R, Owsley C, Hutman L. Assessing spatial vision of older people. *American journal of optometry and physiological optics*. 1982;59(12):961-8.
101. Billino J, Bremmer F, Gegenfurtner KR. Differential aging of motion processing mechanisms: evidence against general perceptual decline. *Vision research*. 2008;48(10):1254-61.
102. Roudaia E, Bennett PJ, Sekuler AB. The effect of aging on contour integration. *Journal of Vision*. 2007;7(9):604-.
103. Atchley P, Andersen GJ. The effect of age, retinal eccentricity, and speed on the detection of optic flow components. *Psychology and aging*. 1998;13(2):297.
104. Andersen GJ, Cisneros J, Atchley P, Saidpour A. Speed, size, and edge-rate information for the detection of collision events. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 1999;25(1):256.
105. Andersen GJ, Enriquez A. Aging and the detection of observer and moving object collisions. *Psychology and aging*. 2006;21(1):74.
106. Langford J, Koppel S. Epidemiology of older driver crashes—identifying older driver risk factors and exposure patterns. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2006;9(5):309-21.
107. Huseth-Zosel AL, Hammer KD. Risky driving behaviors for older adults: Differences by veteran's status. *Journal of Community Health*. 2018:1-6.
108. Raz N, Gunning-Dixon F, Head D, Rodrigue KM, Williamson A, Acker JD. Aging, sexual dimorphism, and hemispheric asymmetry of the cerebral cortex: replicability of regional differences in volume. *Neurobiology of aging*. 2004;25(3):377-96.
109. Higgins KE, Wood J, Tait A. Vision and driving: Selective effect of optical blur on different driving tasks. *Human Factors*. 1998;40(2):224-32.
110. Peli E, Bowers AR, Mandel AJ, Higgins K, Goldstein RB, Bobrow L. Design for simulator performance evaluations of driving with vision impairments and visual aids. *Transportation Research Record*. 2005;1937(1):128-35.
111. Bowers A, Peli E, Elgin J, Mcgwin Jr G, Owsley C. On-road driving with moderate visual field loss. *Optometry and Vision Science*. 2005;82(8):657-67.

112. Strebel S, Neumann C. Creating high contrast in virtual night driving. *Advanced Optical Technologies*. 2019;8(1):47-54.
113. Aarrij F, Hussain A, Hussain S, Shakoor A. Assessment of visual functions in night drivers. *Ophthalmology Pakistan*. 2018;8(02):21-4.
114. Leibowitz H, Owens D. Nighttime driving accidents and selective visual degradation. *Science*. 1977;197(4302):422-3.
115. Wood J, D Alfred O. Standard measures of visual acuity do not predict drivers' recognition performance under day or night conditions. *Optometry and vision science*. 2005;82(8):698-705.
116. Sullivan JM, Flannagan MJ. The role of ambient light level in fatal crashes: inferences from daylight saving time transitions. *Accident Analysis & Prevention*. 2002;34(4):487-98.
117. Jonah BA. Age differences in risky driving. *Health Education Research*. 1990;5(2):139-49.
118. Owsley C, McGwin G, Antin JF, Wood JM, Elgin J. The Alabama VIP older driver study rationale and design: examining the relationship between vision impairment and driving using naturalistic driving techniques. *BMC ophthalmology*. 2018;18(1):32.
119. Allen MJ. Night vision performance tester. Google Patents; 1969.
120. Waetjen R, Schiefer U, Gaigl A, Aulhorn E. Influence of windshield tint and tilt on recognition distance under mesopic conditions. *German journal of ophthalmology*. 1992;1(6):424-8.
121. Ross J, Bradley A. Visual performance and patient preference: a comparison of anti-reflection coated and uncoated spectacle lenses. *Journal of the American Optometric Association*. 1997;68(6):361-6.
122. Bachman WG, Weaver JL. Comparison between anti-reflection-coated and uncoated spectacle lenses for presbyopic highway patrol troopers. *Journal of the American Optometric Association*. 1999;70(2):103-9.
123. Coupland S, Kirkham T. Improved contrast sensitivity with antireflective coated lenses in the presence of glare. *Canadian journal of ophthalmology Journal canadien d'ophtalmologie*. 1981;16(3):136-40.
124. Schallhorn S, Blanton C, Kaupp S, Reid J, Ginsburg A, Sutphin J, et al. Night driving simulation as a functional test of visual performance after photorefractive keratectomy. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*. 1997;38(4).
125. Olson PL, Sivak M. Comparison of headlamp visibility distance and stopping distance. *Perceptual and Motor Skills*. 1983;57(3\_suppl):1177-8.
126. Perel M, Olson PL, Sivak M, Medlin Jr JW. Motor vehicle forward lighting. *SAE Transactions*. 1983:797-831.
127. Arumi P, Chauhan K, Charmant W. Accommodation and acuity under night-driving illumination levels. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 1997;17(4):291-9.



128. Plainis S, Murray IJ, Charman WN. The role of retinal adaptation in night driving. *Optometry and vision science*. 2005;82(8):682-8.
129. Horswill MS, Anstey KJ, Hatherly C, Wood JM, Pachana NA. Older drivers' insight into their hazard perception ability. *Accid Anal Prev*. 2011;43(6):2121-7.
130. Bohensky M, Charlton J, Odell M, Keeffe J. Implications of vision testing for older driver licensing. *Traffic Inj Prev*. 2008;9(4):304-13.
131. Lee J, Mehler B, Reimer B, Ebe K, Coughlin JF. Relationships Between Older Drivers' Cognitive Abilities as Assessed on the MoCA and Glance Patterns During Visual-Manual Radio Tuning While Driving. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*. 2016.
132. Wood JM, Lacherez P, Tyrrell RA. Seeing pedestrians at night: effect of driver age and visual abilities. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2014;34(4):452-8.
133. Directa FL. Mayores de 65 años al volante DGT. 2016.
134. Aguilar HM, F. Óptica Fisiológica. Universidad Politécnica de Valencia. Servicio de Publicaciones 1994.
135. Hecht S. The visual discrimination of intensity and the Weber-Fechner law. *The Journal of general physiology*. 1924;7(2):235.
136. Fuente Valentín IDI, González Vizmanos J. Iluminación en los gabinetes optométricos. *Ver y Oír*. 2002;19(167):504-10.
137. Vision V. Test Instructions, Operation of the CSV-1000 2019 [Available from: <http://www.vectorvision.com/test-instructions/>].
138. Bland JM, Altman D. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The lancet*. 1986;327(8476):307-10.
139. Owsley C, McGwin Jr G. Vision and driving. *Vision Research*. 2010;50(23):2348-61.
140. Fong D, Seddon J. Public health and the eye. *Survey of ophthalmology*. 2012;57(2).
141. Kim E, Muennig P, Rosen Z. Vision zero: a toolkit for road safety in the modern era. *Injury Epidemiology*. 2017;4(1):1.
142. Owsley C, McGwin G, Jr. Vision Impairment and Driving. *Survey of Ophthalmology*. 2011;43(6):535-50.
143. Burg A. Some preliminary findings concerning the relation between vision and driving performance. *Journal of the American Optometric Association*. 1967;38(5):372-7.
144. Cashell G. Visual function in relation to road accidents. *Injury*. 1970;2(1):8-10.
145. Humphries D. Three south african studies on the relation between road accidents and drivers vision. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 1987;7(1):73-9.

146. Coeckelbergh TR, Brouwer WH, Cornelissen FW, Van Wolffelaar P, Kooijman AC. The effect of visual field defects on driving performance: a driving simulator study. *Archives of ophthalmology*. 2002;120(11):1509-16.
147. Verriest G, Neubauer O, Marre M, Uvijls A. New investigations concerning the relationships between congenital colour vision defects and road traffic security. *International ophthalmology*. 1980;2(2):87-99.
148. Hofstetter H. Visual acuity and highway accidents. *Journal of the American Optometric Association*. 1976;47(7):887-93.
149. Keeney A. Relationship of ocular pathology and driving impairment. *Transactions-Pennsylvania Academy of Ophthalmology and Otolaryngology*. 1968;21(1):22-7.
150. Murray CJ, Lopez AD. Alternative projections of mortality and disability by cause 1990–2020: Global Burden of Disease Study. *The Lancet*. 1997;349(9064):1498-504.
151. Van Rijn L. New standards for the visual functions of drivers. Report of the Eyesight Working Group. 2005.
152. van Rijn LJ, Nischler C, Michael R, Heine C, Coeckelbergh T, Wilhelm H, et al. Prevalence of impairment of visual function in European drivers. *Acta ophthalmologica*. 2011;89(2):124-31.
153. Sturr JF, Kline GE, Taub HA. Performance of young and older drivers on a static acuity test under photopic and mesopic luminance conditions. *Human Factors*. 1990;32(1):1-8.
154. Owsley C, McGwin Jr G. Public health and the eye-Vision impairment and driving. *Survey of Ophthalmology*. 1999;43(6):535-50.
155. Hills BL, Burg A. Reanalysis of california driver-vision data: General findings. *Abridgement*1978.
156. Cohen Y, Zadok D, Barkana Y, Shochat Z, Ashkenazi I, Avni I, et al. Relationship between night myopia and night-time motor vehicle accidents. *Acta Ophthalmologica Scandinavica*. 2007;85(4):367-70.
157. Huisingh C, McGwin G, Wood J, Owsley C. The driving visual field and a history of motor vehicle collision involvement in older drivers: a population-based examination. *Investigative ophthalmology & visual science*. 2015;56(1):132-8.
158. Charman WN. Vision and driving-a literature review and commentary. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 1997;17(5):371-91.
159. Sturgis SP, Osgood DJ. Effects of glare and background luminance on visual acuity and contrast sensitivity: implications for driver night vision testing. *Human factors*. 1982;24(3):347-60.
160. Lachenmayr B, Berger J, Buser A, Keller O. Reduced visual capacity increases the risk of accidents in street traffic. *Der Ophthalmologe: Zeitschrift der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft*. 1998;95(1):44-50.

161. Hiraoka T, Hoshi S, Okamoto Y, Okamoto F, Oshika T. Mesopic functional visual acuity in normal subjects. *PloS one*. 2015;10(7):e0134505.
162. Major J, Jolly N. Literature review: non standard vision tests to predict functional vision. *Australian Orthoptic Journal*. 2004;38:35.
163. Owsley C, Swain T, Liu R, McGwin G, Kwon MY. Association of Photopic and Mesopic Contrast Sensitivity in older drivers with risk of motor vehicle collision using naturalistic driving data. *BMC ophthalmology*. 2020;20(1):1-8.
164. Freeman EE, Munoz B, Turano KA, West SK. Measures of visual function and time to driving cessation in older adults. *Optometry and Vision Science*. 2005;82(8):765-73.
165. Henderson S, Gagnon S, Collin C, Tabone R, Stinchcombe A. Near peripheral motion contrast threshold predicts older drivers' simulator performance. *Accident Analysis & Prevention*. 2013;50:103-9.
166. Musselwhite C, Haddad H. Mobility, accessibility and quality of later life. *Quality in Ageing and Older Adults*. 2010;11(1):25-37.
167. Gresset JA, Meyer FM. Risk of accidents among elderly car drivers with visual acuity equal to 6/12 or 6/15 and lack of binocular vision. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 1994;14(1):33-7.
168. Pardhan S. Contrast sensitivity loss with aging: sampling efficiency and equivalent noise at different spatial frequencies. *JOSA A*. 2004;21(2):169-75.
169. Subzwari S, Desapriya E, Babul-Wellar S, Pike I, Turcotte K, Rajabali F, et al. Vision screening of older drivers for preventing road traffic injuries and fatalities. *The Cochrane Library*. 2009.
170. McGwin G, Khoury R, Cross J, Owsley C. Vision impairment and eye care utilization among Americans 50 and older. *Current eye research*. 2010;35(6):451-8.
171. Kline DW, Kline TJ, Fozard JL, Kosnik W, Schieber F, Sekuler R. Vision, aging, and driving: The problems of older drivers. *Journal of gerontology*. 1992;47(1):P27-P34.
172. He Y, Rea M, Bierman A, Bullough J. Evaluating light source efficacy under mesopic conditions using reaction times. *Journal of the Illuminating Engineering Society*. 1997;26(1):125-38.
173. Rassow B. Effect of luminance on contrast sensitivity and glare in the mesopic range. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*. 1999;214(6):401-6.
174. Puell MC, Palomo C, Sánchez-Ramos C, Villeno C. Normal values for photopic and mesopic letter contrast sensitivity. *Journal of Refractive Surgery*. 2004;20(5):484-8.
175. Bailey I, Bullimore M, Raasch T, Taylor H. Clinical grading and the effects of scaling. *Investigative ophthalmology & visual science*. 1991;32(2):422-32.

176. McGraw P, Winn B, Whitaker D. Reliability of the Snellen chart. British Medical Journal Publishing Group; 1995.
177. Regan D, Neima D. Low-contrast letter charts in early diabetic retinopathy, ocular hypertension, glaucoma, and Parkinson's disease. *British journal of ophthalmology*. 1984;68(12):885-9.
178. Tanabe T, Miyata K, Samejima T, Hirohara Y, Mihashi T, Oshika T. Influence of wavefront aberration and corneal subepithelial haze on low-contrast visual acuity after photorefractive keratectomy. *American journal of ophthalmology*. 2004;138(4):620-4.
179. Koefoed VF, Baste V, Roumes C, Høvdning G. Contrast sensitivity measured by two different test methods in healthy, young adults with normal visual acuity. *Acta ophthalmologica*. 2015;93(2):154-61.
180. Michael R, Van Rijn LJ, Van Den Berg TJ, Barraquer RI, Grabner G, Wilhelm H, et al. Association of lens opacities, intraocular straylight, contrast sensitivity and visual acuity in European drivers. *Acta ophthalmologica*. 2009;87(6):666-71.
181. Johnson CA, Casson EJ. Effects of luminance, contrast, and blur on visual acuity. *Optometry and vision science*. 1995;72:864-9.
182. Kimlin JA, Black AA, Wood JM. Nighttime driving in older adults: effects of glare and association with mesopic visual function. *Investigative ophthalmology & visual science*. 2017;58(5):2796-803.
183. Scialfa CT, Garvey PM, Tyrrell RA, Leibowitz HW. Age differences in dynamic contrast thresholds. *Journal of gerontology*. 1992;47(3):P172-P5.
184. Pristavec T. Social participation in later years: the role of driving mobility. *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*. 2016:gbw057.
185. Long GM, Kearns DF. Visibility of text and icon highway signs under dynamic viewing conditions. *Human factors*. 1996;38(4):690-701.
186. Arditi A, Cagenello R. On the statistical reliability of letter-chart visual acuity measurements. *Investigative ophthalmology & visual science*. 1993;34(1):120-9.
187. Hiraoka T, Okamoto C, Ishii Y, Takahira T, Kakita T, Oshika T. Mesopic contrast sensitivity and ocular higher-order aberrations after overnight orthokeratology. *American journal of ophthalmology*. 2008;145(4):645-55. e1.
188. Haughom B, Strand TE. Sine wave mesopic contrast sensitivity—defining the normal range in a young population. *Acta ophthalmologica*. 2013;91(2):176-82.
189. Lin RJ, Ng JS, Nguyen AL. Determinants and standardization of mesopic visual acuity. *Optometry and Vision Science*. 2015;92(5):559-65.
190. Birren JE, Shock NW. Age changes in rate and level of visual dark adaptation. *Journal of Applied Physiology*. 1950;2(7):407-11.

191. Sivak M, Olson PL, Pastalan LA. Effect of driver's age on nighttime legibility of highway signs. *Human Factors*. 1981;23(1):59-64.
192. Mehra M, Rea M, Maniccia D. A field study of visual acuity, color naming and visual search under mesopic lighting. *Proceedings of the IESNA*. 1998.
193. Pesudovs K, Marsack JD, Donnelly WJ, Thibos LN, Applegate RA. Measuring visual acuity-mesopic or photopic conditions, and high or low contrast letters? *Journal of Refractive Surgery*. 2004;20(5):S508-S14.
194. García-Lázaro S, Albarrán-Diego C, Ferrer-Blasco T, Radhakrishnan H, Montés-Micó R. Visual performance comparison between contact lens-based pinhole and simultaneous vision contact lenses. *Clinical and Experimental Optometry*. 2013;96(1):46-52.
195. Frisén L. High-pass resolution perimetry: central-field neuroretinal correlates. *Vision research*. 1995;35(2):293-301.
196. Burg A. Visual acuity as measured by dynamic and static tests: a comparative evaluation. *Journal of Applied Psychology*. 1966;50(6):460.
197. Pitts D. Visual acuity as a function of age. *Journal of the American Optometric Association*. 1982;53(2):117-24.
198. Forbes TW, Pain R. Low contrast and standard visual acuity under mesopic and photopic illumination. *Safety Research Journal*. 1969.
199. Anderson SJ, Holliday IE. Night driving: effects of glare from vehicle headlights on motion perception. *Ophthalmic Physiol Opt*. 1995;15(6):545-51.
200. Klein R, Wang Q, Klein B, Moss SE, Meuer SM. The relationship of age-related maculopathy, cataract, and glaucoma to visual acuity. *Investigative ophthalmology & visual science*. 1995;36(1):182-91.
201. Yamaguchi T, Dogru M, Yamaguchi K, Ono T, Saiki M, Okuyama H, et al. Effect of spherical aberration on visual function under photopic and mesopic conditions after cataract surgery. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2009;35(1):57-63.
202. Kleiner RC, Enger C, Alexander MF, Fine SL. Contrast sensitivity in age-related macular degeneration. *Arch Ophthalmol*. 1988;106(1):55-7.
203. Kuyk T, Elliott JL. Visual factors and mobility in persons with age-related macular degeneration. *Journal of Rehabilitation Research and Development*. 1999;36(4):303-12.
204. Elliott DB, Sanderson K, Conkey A. The reliability of the Pelli-Robson contrast sensitivity chart. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 1990;10(1):21-4.
205. Lovie-Kitchin JE, Brown B. Repeatability and intercorrelations of standard vision tests as a function of age. *Optometry and vision science*. 2000;77(8):412-20.
206. Mäntyjärvi M, Laitinen T. Normal values for the Pelli-Robson contrast sensitivity test1. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2001;27(2):261-6.

## BIBLIOGRAFÍA

207. Vision V. Normal Population Values for CSV-1000E 2019 [Available from: <http://www.vectorvision.com/csv1000-norms/>].
208. Evans DW, Ginsburg AP. Contrast sensitivity predicts age-related differences in highway-sign discriminability. *Human Factors*. 1985;27(6):637-42.
209. Hertenstein H, Bach M, Gross NJ, Beisse F. Marked dissociation of photopic and mesopic contrast sensitivity even in normal observers. *Graefe's archive for clinical and experimental ophthalmology*. 2016;254(2):373-84.
210. Derefeldt G, Lennerstrand G, Lundh B. Age variations in normal human contrast sensitivity. *Acta ophthalmologica*. 1979;57(4):679-90.
211. Wachler BSB, Krueger RR. Normalized contrast sensitivity values. *Journal of Refractive Surgery*. 1998;14(4):463-6.
212. Sloane ME, Owsley C, Alvarez SL. Aging, senile miosis and spatial contrast sensitivity at low luminance. *Vision Research*. 1988;28(11):1235-46.
213. Sloane ME, Owsley C, Jackson CA. Aging and luminance-adaptation effects on spatial contrast sensitivity. *JOSA A*. 1988;5(12):2181-90.
214. Tsai Y-F, Viirre E, Strychacz C, Chase B, Jung T-P. Task performance and eye activity: predicting behavior relating to cognitive workload. *Aviation, space, and environmental medicine*. 2007;78(5):B176-B85.

# ANEXOS

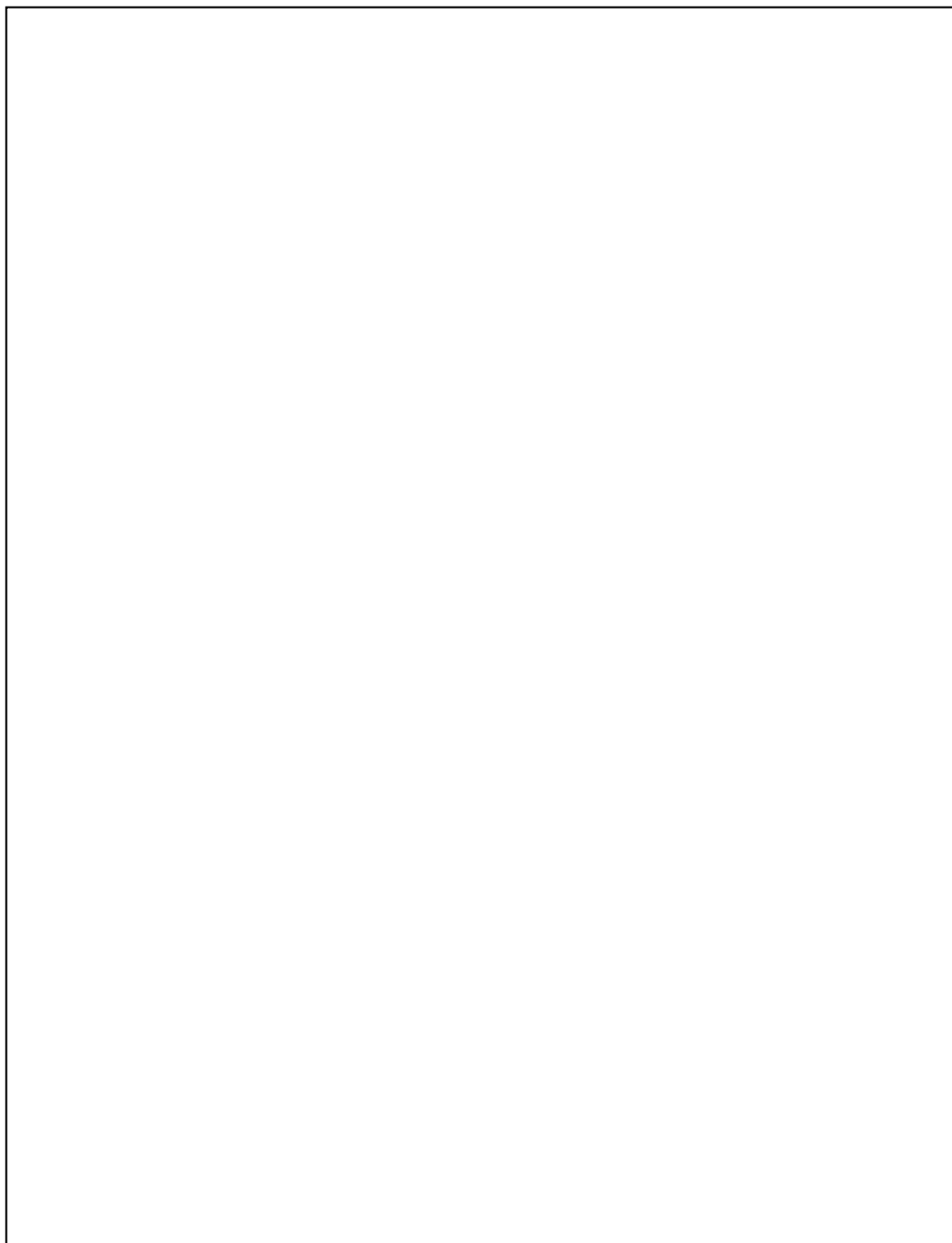
---





## 10 ANEXOS

### 10.1 Comité de ética



## 10.2 Cuaderno de recogida de datos

Título del estudio: Función visual de conductores  
de vehículos en condiciones mesópicas  
Código del estudio: AET-DGT-2012-01



Spin-off de la Universidad  
Complutense de Madrid



Examinador .....

Fecha        /        /

### Anamnesis

#### 1. DATOS DEL PACIENTE

Nombre :		Apellidos:	
F. Nac,:	/	/	
Edad:	Sexo:	Teléfono:	
Móvil	Dirección		
Nº:	Piso:	Localidad:	
CP:	Población:		

#### 2. SALUD Y TRATAMIENTOS

Observaciones .....

#### 3. COMPENSACIÓN ÓPTICA HABITUAL

Lente oftálmica ☐                      Lente de contacto ☐                      Sin compensación

OD    Esf ..... cil ..... eje ..... Ad .....

OI    Esf ..... cil ..... eje ..... Ad .....

#### 4. PRUEBAS OPTOMÉTRICAS

##### 4.1. Condiciones de iluminación mesópica

Tiempo de adaptación a la oscuridad:

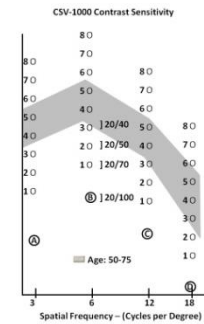
Hora de inicio: .....

Hora de fin: .....

## a) Agudeza visual

	Contraste					
	100%	20%	10%	5%	2.5%	1.25%
Mesópica						

## b) Sensibilidad al contraste



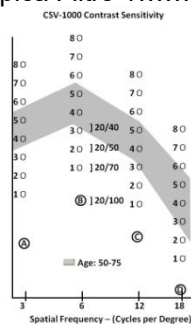
## 4.2. Condiciones de iluminación fotópica (Con filtros de densidad neutra)

## a) Agudeza visual

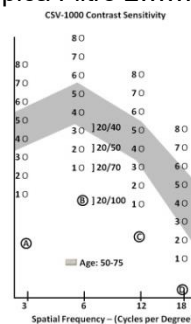
	Contraste					
	100%	20%	10%	5%	2.5%	1.25%
Fotópica filtro 1 .....						
Fotópica filtro 2 .....						
Fotópica filtro 3 .....						
Fotópica filtro 4 .....						
Fotópica filtro 5 .....						
Fotópica filtro 6 .....						

## b) Sensibilidad al contraste

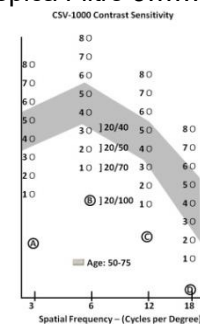
## Fotópica Filtro 1.....



## Fotópica Filtro 2.....



## Fotópica Filtro 3.....

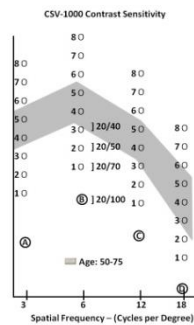
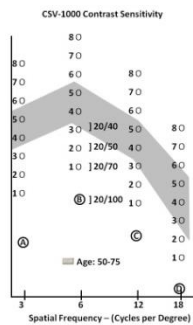
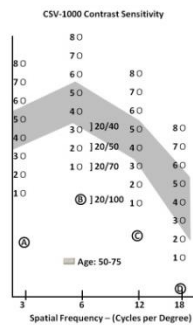


## Fotópica Filtro 4.....

## Fotópica Filtro 5.....

## Fotópica Filtro 6.....

ANEXOS



4.3. Condiciones de iluminación fotópica (Sin filtro)

Tiempo de adaptación a la luz:

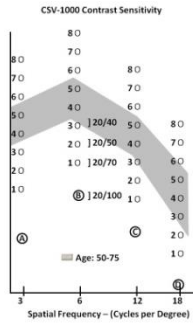
Hora de inicio: .....

Hora de fin: .....

a) Agudeza visual

b) Sensibilidad al contraste

	Contraste					
	100%	20%	10%	5%	2.5%	1.25%
Mesópica						



### 10.3 Consentimiento de investigador principal



Spin-off de la Universidad  
Complutense de Madrid



Título del estudio: Función visual de  
conductores de vehículos en condiciones mesópicas

Código del estudio: AET-DGT-2012-01

Yo, D/Dª ..... con DNI .....  
Del centro ..... afirmo haber leído y evaluado el protocolo  
de este estudio y declaro:

- Que el estudio respeta las normas éticas aplicables a este tipo de estudios.
- Que acepta participar como investigador principal en este estudio.
- Que cuenta con los recursos materiales y humanos necesarios para llevar a cabo el estudio, sin que ello interfiera en la realización de otro tipo de estudios ni en otras tareas que tiene habitualmente encomendadas.
- Que se compromete a que cada sujeto sea tratado y controlado siguiendo lo establecido en el protocolo con dictamen favorable por el Comité Ético de Investigación Clínica.
- Que respetará las normas éticas y legales aplicables a este tipo de estudios y seguirá las normas de buena práctica clínica en su realización.
- Que los colaboradores que necesita para realizar el estudio propuesto son idóneos.

En \_\_\_\_\_ a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Firmado:

D/Dª .....

Investigador Principal

## 10.4 Hoja de información a los participantes



Spin-off de la Universidad  
Complutense de Madrid



Título del estudio: Función visual de  
conductores de vehículos en condiciones mesópicas

Código del estudio: AET-DGT-2012-01

El Grupo de Neuro-Computación y Neuro-Robótica, de la Universidad Complutense de Madrid está desarrollando diferentes estudios con el objetivo de contribuir a la mejora de la seguridad vial mediante el conocimiento de la función visual de conductores y peatones.

Usted ha sido seleccionado para, **si lo desea**, participar en un estudio de investigación, cuyo objetivo es determinar cómo es su visión en condiciones de baja y alta iluminación con y sin la interposición de diferentes gafas.

Para ello, se medirán diferentes parámetros visuales con y sin unas gafas que actúan como filtros, concretamente se valorará su agudeza visual y sensibilidad al contraste. Dado que se trata de una revisión optométrica normal, no existen riesgos por encima de los habituales en la práctica clínica habitual. Sin embargo, puede derivarse un beneficio en la sociedad sobre todo en el ámbito de la seguridad vial.

Los datos personales recogidos no serán incorporados ni cedidos a terceros, el interesado podrá ejercer los derechos de acceso, rectificación, cancelación y oposición mediante escrito dirigido a [celiasr@opt.ucm.es](mailto:celiasr@opt.ucm.es), todo lo cual se informa en cumplimiento del art. 5 de la Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de datos de carácter personal. De acuerdo con esta misma ley, todos los datos recogidos en el transcurso del estudio serán tratados de forma estrictamente confidencial y únicamente serán utilizados para la valoración del estudio, sin desvelar en ningún momento su nombre y apellidos. Con su firma, Vd. autoriza a la investigadora a utilizar los resultados que se obtengan, respetando en todo momento el anonimato. El consentimiento para el tratamiento de sus datos personales y para su cesión es revocable. Vd. puede ejercer el derecho de acceso, rectificación, oposición y cancelación en cualquier momento, dirigiéndose a la investigadora.

Finalmente, se reitera que la participación en este estudio es **voluntaria** y sin gastos adicionales, pudiendo retirarse del mismo en cualquier momento sin tener que dar ninguna explicación y sin suponer ningún perjuicio en sus cuidados médicos.

Grupo de Neuro-Computación y Neuro-Robótica  
Dra. Celia Sánchez-Ramos  
Telf. 6174886

## 10.5 Formulario de consentimiento informado



Spin-off de la Universidad  
Complutense de Madrid



Título del estudio: Función visual de  
conductores de vehículos en condiciones mesópicas

Código del estudio: AET-DGT-2012-01

Yo ..... (nombre y  
apellidos)

He leído la hoja de información que se me ha entregado

He podido hacer preguntas sobre el estudio

He recibido suficiente información sobre el estudio

He hablado con D/Dª ..... (nombre del investigador)

Comprendo que mi **participación es voluntaria**

Comprendo que puedo retirarme del estudio y revocar mi permiso para el uso de los  
datos recogidos:

- ☐ Cuando quiera
- ☐ Sin tener que dar explicaciones
- ☐ Sin que esto repercuta en mis cuidados médicos

Doy permiso expreso para utilizar los resultados de las pruebas para los fines que  
me han explicado

Y presto libremente mi conformidad para participar en el estudio

....., a ..... de ..... de 20 .....

Firma del interesado

Fdo.:.....

DNI: .....

## 10.6 Recomendaciones del Eyesight Working Group



### **New standards for the visual functions of drivers**

Report of the Eyesight Working Group

Brussels, May 2005



## The Eyesight Working Group

**The Eyesight Working Group***Editor of this report and Chairman of the Group:*

Dr LJ van Rijn

*Members of the Working Group:*

G Baten, Belgisch Instituut voor de Verkeersveiligheid (BIVV), afdeling CARA, Belgium  
 Dr TJTP van den Berg, physicist, Netherlands Ophthalmic Research Institute, Amsterdam, The Netherlands  
 Prof dr R Gomez de Liano, ophthalmologist, Madrid, Spain  
 Prof A. Hedin, ophthalmologist, Akademiska sjukhuset, Uppsala, Sweden  
 Dr Lianoros, ophthalmologist, Spain  
 Dr H.G.Major, Driver and Vehicle Licensing Agency, Great Britain  
 Prof (emerita, University of Kupio) M Mäntyjärvi, Ophthalmologist, Finland  
 P Mouterde, France  
 Dr LJ van Rijn, Ophthalmologist FEBOphth, Vrije Universiteit medical centre, Amsterdam, The Netherlands  
 Dr M Tant, Neuropsychologist, Belgisch Instituut voor de Verkeersveiligheid (BIVV), afdeling CARA, Belgium  
 Prof dr H Wilhelm, Ophthalmologist, Eberhard Karls Universität Tübingen, Universitäts-Augenklinik, Tübingen. Germany

*Member on behalf of the European Commission (DG TREN):*

J Valmain

**Address for correspondence**

[Joel.VALMAIN@cec.eu.int](mailto:Joel.VALMAIN@cec.eu.int)  
[vanRijn@vumc.nl](mailto:vanRijn@vumc.nl)

**Legal notice**

This document reflects the consensus of experts who gathered to discuss the difficult issues contained herein. Consensus is generally defined as the majority opinion or general agreement of the group. In that vein, it should be noted that consensus does not mean that all of the participants unanimously agreed on all of the findings and recommendations. This report is based on publicly available data and information. The report reflects the views of a panel of thoughtful people who understand the issues before them and who carefully discussed the available data on the issues.

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

## Table of Contents

The Eyesight Working Group.....	- 2 -
Address for correspondence.....	- 2 -
Legal notice .....	- 2 -
Table of Contents.....	- 3 -
Summary.....	- 4 -
Background.....	- 4 -
Towards a rational approach to the relation between visual functions and driving safety .....	- 5 -
Visual functions .....	- 6 -
Visual acuity.....	- 6 -
Visual field.....	- 8 -
Measurement of visual field with known or suspected abnormalities .....	- 9 -
Measurement of visual field for screening purposes .....	- 11 -
Contrast sensitivity.....	- 11 -
Glare sensitivity.....	- 13 -
Useful field of view (UFOV).....	- 14 -
Diplopia .....	- 14 -
Biopic devices and other visual enhancement devices .....	- 15 -
Periodic screening of drivers .....	- 16 -
Exceptional cases: restricted licences .....	- 17 -
Conclusions.....	- 19 -
Principles of testing.....	- 19 -
Current guidelines and proposed changes.....	- 20 -
Group 1 .....	- 20 -
1) The horizontal visual field should be at least 120 degrees .....	- 20 -
2) No progressive eye disease should be present, when a progressive eye disease is present, regular check-ups are requested.....	- 22 -
3) In case of total functional loss of vision in one eye, the visual acuity must be at least 0.6. ....	- 22 -
4) There are no requirements for twilight vision, other than in cases of doubt. ....	- 22 -
5) There are no requirements for the absence of diplopia.....	- 23 -
Group 2 .....	- 23 -
1) The visual acuity should be at least 0.8 in the best eye, 0.5 in the fellow eye.....	- 23 -
2) Glasses should be $\pm$ 8 dioptries or less .....	- 23 -
3) Normal visual fields should be present in both eyes. ....	- 24 -
4) No requirements for twilight vision (contrast sensitivity and/or glare sensitivity) are included. ....	- 24 -
5) Requirements for the absence of diplopia are scarcely formulated.....	- 25 -
General.....	- 25 -
1) There are no requirements for periodic testing nor procedures in case of the development of eye disease between testing periods.....	- 25 -
2) There is a difference between screening (aimed at detection of disease) and testing (aiming at measuring known abnormalities) .....	- 25 -
3) There is no adaptation period following newly developed eye disorders. ....	- 26 -
4) There is only limited opportunity for a restricted licence (exceptional cases)....	- 26 -
5) There is pressure from interest groups to allow driving with Biopic devices.....	- 27 -
References .....	- 27 -

## The Eyesight Working Group

**Summary**

This report comprises the advice of the Eyesight Working Group to the European Driving Licence Committee for a possible revision of the standards on vision for driving. On many issues, scientific evidence is scarce, so that continued research remains very important in order to strengthen the basis for the standards. The major recommendations are the following.

1. Visual acuity requirements should be formulated binocularly. For the worst eye of Group 2 drivers, only a minimal standard of visual acuity is required.
2. The paragraph on visual fields should be reformulated to include requirements on the vertical extension, absence of central defects and use of the test method.
3. Requirements for twilight vision should be considered, future introduction of these and other requirements should be made possible and anticipated.
4. Requirements for the absence of diplopia should be formulated, to include Group 1 drivers.
5. An adaptation period should be required after a newly developed eye disease.
6. Restricted licences should be considered for Group 1 drivers. The conditions for such restricted licences should be carefully judged.
7. Regarding periodic screening: current evidence for the efficacy and efficiency of screening is rather scarce. We recommend additional research to be performed in this field. If, due to desired harmonization of European standards, screening should be implemented, we recommend screening (at least for Group 1) should not commence before the age of 60. People with eye diseases / impaired visual functions should be required to verify themselves whether they meet the standards.

**Background**

Driving is a complex task, involving both perceptual functions and motor skills. Vision is the most important source of perceptual information for the driver (Rockwell, 1972). Because of the potentially significant consequences of impaired driving (damage and injury to oneself and others) it is reasonable to specify standards for the visual capacity of drivers. Strict standards would best serve traffic safety. However, in our society, being able to drive is of utmost importance for many reasons, socially as well as economically. Therefore, standards on vision should be not so strict that subjects are excluded from driving without good cause. Carefully balancing the requirements on vision so that both traffic safety in general and the mobility of individual drivers are optimally safeguarded, remains a continuing challenge to both scientists and government officials.

In 1992, the European Commission established standards for testing the visual function of drivers in the Council Directive 91/439/EEC (1991). In 2003 there was a proposal for a small revision of these standards. Today, a need for wider revision of the standards is recognised in order to resolve some apparent inconsistencies and to make sure that the standards, where possible, are based on scientific evidence. The Eyesight Working Group was established in March of 2004 by the EC Driving Licence Committee to give advice as to how to adjust the standards. This report is the product of the Working Group. When exposure is taken into account, i.e. when the number of accidents is measured per number of kilometres driven, then there is an increase in the number of accidents with

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

age (Massie et al., 1997; Ryan, Legge and Rosmann, 1998; Dellinger, Langlois and Li, 2002; Williams and Carsten, 1989), although this has been disputed by others (Stutts and Martell, 1992). Vision may play an important role in this increase in accidents at higher ages. Drivers with ocular disease drive less safely than those without ocular disease (e.g. Wood and Mallon, 2001; Wood 2002). This is also true for specific ocular diseases such as cataract (Owsley et al., 1999; 2002) and glaucoma (Owsley et al., 1998b), although again, this relationship has been disputed by others (Gresset and Meyer, 1994; Fonda, 1989). Cataract surgery has a profound positive effect on self-estimated problems during driving (Mönestam and Wachtmeister, 1997).

As age increases, the prevalence of eye disease increases (Gibson et al., 1985; vanNewkirk et al., 2001; Ivers et al., 2000). This is true for the major eye diseases such as cataract (e.g. Hirverlä et al., 1995), glaucoma (Wensor et al., 1998; Klein et al., 1992; Coffey et al., 1993; Dielemans et al., 1994) and age-related macular degeneration (Vinding et al., 1990; Pauleikhoff et al., 1992). Even in the absence of ocular disease, visual function deteriorates with age (Haegerstrom-Portnoy, 1999; Puell et al., 2004; Ivers et al., 2000). Necessarily, therefore, the discussion about vision and driving focuses mainly on older drivers. This issue will gain increasing importance in future decades because of the increasing number of elderly in the population and because of increasing mobility at higher ages. Some ocular issues are however of particular importance for younger drivers. These are mainly amblyopia (reduced vision in one eye often as a result of squint) and developmental or degenerative eye disorders such as albinism or retinitis pigmentosa.

#### **Towards a rational approach of the relation between visual functions and driving safety**

We can distinguish several visual functions including visual acuity, visual field and contrast sensitivity. These functions are basically independent of each other although many disorders and diseases of the eye cause impairments in more than one function. For example: cataract leads to decreased visual acuity but also to decreased contrast sensitivity. Decreased visual acuity is usually but not always associated with decreased contrast sensitivity. For a complete assessment of vision obviously all visual functions should be considered. The current guidelines (Council Directive 91/439/EEC (1991), focus exclusively on visual acuity and visual field. Other functions, such as contrast sensitivity, glare sensitivity and Useful Field of View are not, currently, formal constituents of the standards although "twilight vision" is briefly mentioned: "when there is reason to doubt, (...) attention shall be paid to (...) twilight vision."

Alternatively, we may distinguish functional vision (Colenbrander, 2003). This includes performance of daily life skills, including driving ability. Loss of visual function is related to the presence of eye disorders and can be described by impairment categories (e.g. visual acuity below 0.5). Loss of functional vision, e.g. loss of driving ability or performance can be described in terms of disability (e.g. loss of night driving ability). Functional vision, such as driving ability, is related to visual functions but only indirectly so (see Colenbrander, 2003). This will be further discussed in the paragraphs on restricted licences.

### The Eyesight Working Group

The aim of new standards for visual functions of drivers is to increase traffic safety by denying or restricting the driving licence of those drivers with visual impairments. Before this can be achieved, several questions should be answered.

- 1) Can we identify the various visual functions that play a role in driving safety?
- 2) Can we establish a cut-off value for each of these visual functions, below which driving is unsafe and above which driving can be allowed?
- 3) Do we have measurement instruments to identify those visual functions in a valid and reliable manner?

These are the questions that deal strictly with the implementation of new standards. Additional questions concern the enforcement of the standards. For example, will drivers undergo regular testing (screening) of visual function and, if so, from what age and at what intervals? This requires insight into the prevalence of impairments, the costs involved in screening and the sensitivity and specificity of tests.

### **Visual functions**

#### **Visual acuity.**

This is the capacity to perceive small details. It is generally considered the most important modality of visual function and is tested using a character set, usually a letter chart, with characters of decreasing size, at a distance of 3 to 6 meters. Characters have high contrast (black letters on a white background) and the chart illumination is optimal. In studies on accident statistics, visual acuity was only weakly, though significantly correlated with traffic accidents and violations. The increased accident risk can be expressed as Relative Risk (or, in case of control studies, as Odds Ratio). This is the ratio between the accident risk in the impaired group and the accident risk in the control group. Van Rijn and Völker-Dieben (1999) reviewed the studies on the relation between impaired visual acuity and increased accident risk. The results are summarized in Table 1, which is copied from that review. Relative Risk values are typically below 2, with some exceptions. The most cited study is the one of Burg (1971). The data were re-analysed by Hills and Burg (1977). They found no relationship between visual acuity and accidents in young and middle aged drivers. In elderly drivers they reported a weak relationship between acuity and traffic accidents. Other studies have been published about the relationship between visual acuity and traffic safety. Hofstetter (1976) investigated 13,786 drivers and compared accidents for drivers in the lower quartile with those above the mean. In this study, a poor visual acuity led to being twice as likely to be involved in 3 accidents in the previous 12 months and 50% more likely to be involved in 2 accidents. For one accident there was no difference. Keefe et al. (2002) investigated 2594 subjects. They measured visual function and questioned people about their driving behaviour. They found that subjects with a visual acuity below 6/12 were no more likely to have a (self-reported) accident than those with a better acuity. Foley et al. (1995) found no relation between visual acuity and self-reported accidents in 1791 drivers of 68 years and older in a rural Iowa setting. Decina and Staplin (1993) correlated the visual acuity to accidents, taking self-reported mileage into account, and found no relation between isolated visual acuity and accident incidence (see also at contrast sensitivity). A small study (Lamble et al., 2002), involving driving assessment of subjects with X-linked

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

retinoschizis (an hereditary disease in which visual acuity but not contrast sensitivity is reduced) failed to demonstrate an association between visual acuity and impaired driving performance.

From the studies, cited above, it emerges that the relation between visual acuity and traffic accidents is rather weak. Because of the importance of visual acuity in daily life (see e.g. van Rijn et al., 2002), one would assume that the relation between visual acuity and traffic accidents is strong, then why can this not be demonstrated in scientific studies? Several factors may play a role. Firstly, in these studies, the extreme values on the spectrum of visual acuities are rare: elderly subjects with very good visual acuities are rare, just as are elderly drivers with very low acuities. Therefore, in most studies, moderate acuities are compared to mildly impaired acuities, leading to only weak relations between impaired acuities and traffic accidents. Notably, the absence of low acuities in the population may (at least partly) be the result of existing regulations. Secondly, especially for visual acuity, the relation may be weakened by adaptive behaviour of the drivers. Of the elderly who have stopped driving or adjusted their driving behaviour, many did so because of visual problems (Keefe et al., 2002; Gilhotra et al., 2001; West et al., 2003) although this has been disputed by others (Holland and Rabbitt, 1992). Thirdly, the relation may be blurred by confounding variables. For example, early cataract leads to only moderate decrease of visual acuity, but also to decreased contrast sensitivity and increased glare sensitivity. Thus, the effects of cataract on contrast sensitivity and glare sensitivity may mask the relation between visual acuity and driving safety. Higgins et al. (1998) found a linear relation between visual acuity decrease (produced by optical blur) and driving performance. However, when cataract was simulated by special filters (leading to only to a mild decrease of visual acuity, but affecting glare sensitivity much more), then the effects on driving performance were much more pronounced (Wood and Higgins, 1999), suggesting that glare sensitivity is more important for driving performance than visual acuity.

Visual acuity can be measured in a valid and reliable manner. The measurements are robust (revealing identical results in various measurement circumstances) and reproducible (Hawkins, 1995; Elliott and Sheridan, 1988) and they have good face validity. This means that for most people the assessment of visual acuity for driving is considered appropriate and acceptable.

From the studies discussed in this paragraph, it appears that visual acuity is the most important measure of visual function in general and that it can be measured very well. The relation of its outcome to traffic safety is, however, rather weak. Several causes for this have been discussed above. It seems advisable in the standards to increase the role of other parameters of visual function at the cost of visual acuity. One could consider contrast sensitivity and glare sensitivity. However, as will be discussed below, measurement of these parameters is less straightforward. Until more insight has been gained into the applicability of these other parameters of visual function, the importance of visual acuity measurements for traffic safety should not be underestimated.

## The Eyesight Working Group

**Table 1.** Criterion validity of Snellen acuity measurements (table from van Rijn and Völker-Dieben, 1999).

Authors	Type	subjects	relative risk Or odds ratio	95% conf Interval	P	type
Burg, 1971 (Hills&Burg, 1977)	Cohort	14283	NR			
Von Hebenstreit, 1984	Cohort	663	1.17	1.06 to 1.29	0.03	RR
Davison, 1985	Cohort	1000	7.68	2.47 to 23.89	0.02	RR
Marottoli et al., 1998	Cohort	125	1.31	0.83 to 2.09	0.32	RR
Owsley et al., 1998a	Cohort	294	1.45	0.58 to 3.64	0.43	RR
Szlyk et al., 1995a	case-control	107	NR			
Rogers, 1987	case-control	?	1.37	?		RR
Von Hebenstreit, 1993	case-control	1200	1.24	0.66 to 2.32	0.62	RR
Liesmaa, 1973	case-control	1021	3	?		RR
Alsirk, 1992	case-control	700	5.06	1.29 to 23.11	0.014	OR
McCloskey et al., 1994	case-control	683	0.78	0.39 to 1.60	0.64	OR
Szlyk et al., 1995b	case-control	20	0.12	0.00 to 1.72	0.16	OR
Lachenmayr et al., 1998	case-control	1004	NR			
Owsley et al., 1998b <i>inj</i>	case-control	303	1.6	0.6 to 3.8		OR
Owsley et al., 1998b <i>non-inj</i>	case-control	303	1.6	0.7 to 3.6		OR
Sims et al., 1998	case-control	174	NR			

95% conf int = 95% confidence interval; P = P value; OR = odds ratio; RR = relative risk; NR = not reported

**Visual field.**

The visual field is the perceptual space available to the fixating eye. The binocular visual field is the sum of the perceptual spaces available to both fixating eyes. An intact visual field provides the capacity to detect objects (or lights or movements) away from the fixation point. Impairments of visual field increase with age. The leading cause of visual field impairments in the elderly is glaucoma (e.g. Ramrattan, 2001). Visual field defects have been associated with a mild increase in accident risks. The typical relative risk values that were reported in the studies were about 2 (see van Rijn and Völker-Dieben, 1999 for an overview). A major problem in interpreting these studies is that there is no consensus regarding the definition of impairment. For example, in the classical and often cited study of Johnson and Keltner (1983), an impairment of visual field was defined as two or more adjacent targets that were missed. This may be a significant defect in clinical terms (pointing at disease) but, depending on the location of the defects, may have only a mild impact on driving performance. It has been shown that visual field sensitivities decrease with age (Haas et al., 1986; Jaffe et al., 1986) and as a result, Johnson and Keltner may have compared physiologically decreased normal visual fields with mildly impaired ones. Driving simulator studies and studies involving on-road testing of subjects with impaired visual fields, have found a strong relation between the extent of the visual field defect and driving performance: Coeckelbergh et al. (2002) demonstrated that subjects with central and mid-peripheral visual field defects drove slower and needed a longer time to react. Subjects with peripheral visual field defects had increased swaying. Tant et al. (2002), in a study with hemianopic subjects, found that generally the driving

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

performance of these subjects was low, although it was argued that a specific negative selection bias was present in the study. Only some subjects were found fit to drive after a specific training programme (Tant et al., 2001). Szlyk et al. (1992) found more crashes both in driving simulator tasks and state records during the preceding 5 years in 21 drivers with retinitis pigmentosa than in 31 healthy control subjects. Visual field size was the best predictor of real-world and simulator crashes. The same holds true for studies into the walking (or wheelchair) mobility of subjects with impaired visual fields (e.g. Kuyk et al., 1998; Lovie-Kitchin et al., 1990). Lövsund, Hedin and Törnros (1991) reported that individual variation in the group with visual field impairments was very large, making the group as a whole unsuitable for driving. Szlyk et al. (2002) studied driving behaviour in a driving simulator in subjects with mild to moderate glaucomatous damage. They found that driving performance was indeed related to the presence of glaucoma but interestingly in these subjects, contrast sensitivity rather than visual field defect was the relevant visual function. In a recent report, Szlyk found that visual field defects within 100 degrees correlated with driving performance and with accidents (Szlyk et al., 2005a). Hedin and Lövsund (1986) reported that in a group of 27 subjects with impaired visual fields (mostly homonymous defects) only 4 were capable of compensating for their defects. Homonymous hemianopia is a condition in which, due to a neurological cause (mostly stroke, traumatic brain injury or tumour) the visual field on one side in both eyes is blind. The consensus is that generally this condition is incompatible with fitness to drive although occasionally, subjects with hemianopia may drive safely (Tant, 2002; Tant et al., 2001; 2002). A major factor may be that visual field defects may be accompanied by other neurological and neuropsychological (e.g. attentional) deficits which can also strongly affect driving performance (Tant, 2002; Tant et al., 2001; 2002). It should be noted that probably many subjects with hemianopic visual field defects continue to drive, most often because their stroke has remained unnoticed to them (Gilhotra et al., 2002) but only few of the homonymous defects in this study were complete hemianopias.

Based on the literature cited above, it is evident that an adequate visual field is of utmost importance for the ability to drive safely. However, the actual cut-off value that should be set in the standards is as yet unclear. Further research is needed.

Experiments have been performed in which the visual field is expanded on the hemianopic side, using different kinds of prismatic devices. The success of these experiments is limited (see, e.g. Szlyk et al., 2005b) although currently other evaluation studies are being performed using alternative prismatic devices. The Eyesight Working Group does not favour the use of such devices in order to meet the visual field standards (see discussion on Bioptic devices).

*Measurement of visual field with known or suspected abnormalities*

For subjects with known or suspected abnormalities, visual fields are generally measured using a perimeter. This is a device that can present light stimuli at various locations in the visual field. The subject being tested is requested to indicate whether the stimulus has been seen. Most perimeters are rather costly but for this purpose, there is no alternative. In selected subjects, practice and education are needed before adequate and reproducible visual field results are obtained (e.g. Parrish, Schiffmann and Anderson, 1984; Lewis et



## The Eyesight Working Group

al., 1986; Katz and Sommer, 1990). In addition, care should be taken that any refractive error is adequately corrected prior to testing. Failure to correct the refractive error can lead to a large number of false positive measurement results (subjects with impaired results whereas they are, in reality, not impaired). (Weinreb et al., 1986; Rabineau et al., 1989; Anderson et al., 2001; van Rijn et al., 2005). Generally, visual fields are tested monocularly; binocular fields may be extrapolated from the monocular results (e.g. Crabb et al., 1998; Nelson-Quigg et al., 2000). However, for task-oriented measurement of the visual field, it would be sufficient to measure binocular fields only. Perimetry techniques can be divided into static techniques and kinetic techniques (e.g. Goldmann perimetry). Static techniques are mostly automated. In these techniques, light stimuli are presented in pre-set areas of the visual field. In Goldmann kinetic perimetry, a light stimulus is moved (manually by an examiner) usually from the periphery towards the centre of the visual field. Kinetic perimetry does not always disclose defects of significance (e.g. in retinitis pigmentosa) and at times suffers from examiner bias. Depending on the experience of examiner, central and paracentral defects may be missed. Therefore, in general, static perimetry is strongly recommended. However, in selected subjects, kinetic perimetry may still be necessary. In particular, some subjects with neurologic visual field impairment suffer from stato-kinetic dissociation (Riddoch phenomenon). This implies that moving objects (such as in traffic situations) are perceived better than static ones. Compared to age-related testing, suprathreshold screening programmes are less sensitive and may overlook, for example, the moth-eaten fields after heavy photocoagulation (as best evident with high pass resolution perimetry - ring perimetry).

Current perimetry techniques are directed at the evaluation of disease. This shows itself in the areas and size of the visual field that is being tested, the distribution of points and the evaluation of the results (comparison with age-matched controls). This makes these techniques less suitable for the evaluation of task-oriented function as is important for driving. The Esterman technique is an exception: this is a task-oriented algorithm, implemented on a static automated perimeter. This technique has not been specifically developed for the evaluation of drivers but for visual function in general. It is unsuited for driving not only because of the position of the test points but also because of its use of a fairly intense and large stimulus (III/4e). Hence, although automated perimetry using the Esterman protocol is easier to perform than standard perimetry, it is more lenient (Crabb et al., 2004; van Rijn, 2003) and we advise against it.

For this reason it is recommended to develop a 'traffic perimetry algorithm', analogous to the recommendations of the German Ophthalmological Society (1999). This should preferably comprise a sufficient number of test points within the area of interest. A sufficient number of those (e.g. 25) should be located in the central area of the visual field since this area is of particular importance for perception during driving and perception in general. The luminance of test points should be related to that of the hill of vision, i.e. with increasing intensity towards the periphery. With such a test at hand, it would be possible to lay down the number of missed test points, centrally as well as in the periphery, acceptable for a driving licence. Rough guidelines about the number of points that may be missed could help for a first assessment of visual fields. However, we note that expert judgement of visual fields remains very important since, expectedly,

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

good judgement of visual field cannot be completely performed by an automated routine. Any specification which is too detailed brings with it ambiguities, especially since the characteristics of the scotomas depend on the method used to define them. We therefore suggest that, in cases of doubt, visual fields will be judged on an individual basis by a panel of specialists (possibly in a national expert centre, see section on restricted licences) although we realise that, from a practical point of view, it may be impossible that all isolated defects will be judged on an individual basis. We therefore suggest that some rough guidelines should be developed to discriminate between those defects that are allowed, those defects that are not allowed and those that should be referred to a specialist centre for further judgement.

*Measurement of visual field for screening purposes*

For screening subjects with a low likelihood of visual field defects, perimetry may be less efficient since it requires rather costly equipment. There are simple devices that test the ability to detect LEDs along the horizontal meridian but their capacity to detect field defects is not known. Often, the Donders confrontation method is advocated for screening purposes. In this confrontation method, the visual field is tested by an examiner using hand movements. The sensitivity and specificity of this method are very low (e.g. Johnson and Baloh, 1991; Shahinfar et al., 1995) except perhaps for hemianopic visual field defects (Shahinfar et al., 1995). For the purpose of screening the visual fields of healthy licence candidates, there is a need for a simple, reliable and quick test that could be administered by any person.

**Contrast sensitivity.**

This is the ability to distinguish grey letters on a white background. This simulates the conditions during driving at night when objects to be detected are more similar in contrast to their surroundings than during daylight conditions. A subject with impaired contrast sensitivity may, for example, have difficulty in detecting a dark-coated pedestrian at night (e.g. Wood et al., 2002). In the absence of ocular disease, contrast sensitivity is related to visual acuity (Brown and Lovie-Kitchin, 1989), but in specific ocular diseases, such as cataract (Anderson and Holliday, 1995) and age-related macular degeneration (Kleiner et al., 1988), contrast sensitivity may be more affected than visual acuity.

Contrast sensitivity has been found to have a stronger relation with traffic accidents and violations than visual acuity, although the number of available studies is low. Marottoli et al. (1998) found a Relative Risk of 2 for accident involvement for Pelli-Robson contrast sensitivity values below 1.35. Owsley et al. (2001) found that drivers with a crash history were 8 times more likely to have a Pelli-Robson contrast sensitivity of below 1.25 than drivers who were crash free. Dunne et al. (1998) found that drivers with impaired low contrast acuity had twice as many crashes as those without. Pfoff and Werner (1994) found that cataract surgery leads to increased contrast sensitivity and decreased glare sensitivity and that subjects increased their night-time driving frequency after cataract surgery, even though visual acuity was above 0.5 before (and after) surgery. Wood and Troutbeck (1995) found that simulated cataract in normal subjects leads to impaired driving performance. This simulated cataract was associated with decreased UFOV (see

## The Eyesight Working Group

later) and contrast sensitivity scores. Anderson and Holliday (1995) found a strong correlation between simulated cataract and decreased contrast sensitivity for moving targets during night-time, even though visual acuity was unimpaired. Szlyk et al. (1995) found that macular degeneration was associated with decreased driving performance in a simulator, but not to increased risk in real world due to adaptive behaviour. Notably, in the macular degeneration group, both visual acuity and contrast sensitivity were reduced. Mäntyjärvi and Tuppurainen (1999) investigated drivers with early cataract and found that, even when visual acuity is still 0.5, contrast sensitivity, glare and photostress may be severely disturbed. Szlyk et al. (2002) found that decreased driving performance in a driving simulator of subjects with mild to moderate glaucomatous defects was associated with their decreased contrast sensitivity (and not with their visual field defects). Even so, contrast sensitivity was only mildly decreased in these subjects. Wood (2002) found that decreased vision caused by simulated cataract by filters was better associated with contrast sensitivity than with visual acuity. Decina and Staplin (1993) correlated the visual acuity to accidents taking self-reported mileage into account and found no relation between isolated visual acuity and accident incidence but did find a relation between accidents and a combination of visual acuity, visual field and contrast sensitivity in drivers aged 66 and over.

From the studies cited above, it appears that contrast sensitivity may provide important information about the visual capacity of drivers in addition to the measurement of visual acuity alone (Brown and Lovie-Kitchin, 1989). The problem is that we do not know yet what cut-off value should be imposed upon contrast sensitivity measurements. We do know that impaired contrast sensitivity affects driving performance but we do not know what level of contrast sensitivity is acceptable and what level is not acceptable. Further study is needed. When considering implementation of contrast sensitivity standards, the prevalence of impairments should be considered carefully. In a recent study into the prevalence of vision impairments in European drivers (van Rijn et al., 2005), it was found that contrast sensitivity values (Pelli-Robson below 1.25) are very rare in young drivers, but are present in 1.7% of drivers between 65 and 74 years of age and in 6.3% of drivers of 75 years and older. Values between 1.25 and 1.5 are present in an additional 19.1% of drivers of 75 years and older. Thus, although the actual definition of impaired contrast sensitivity for drivers still needs to be established, it seems that the prevalence of impairments is much higher than the prevalence of impairments of visual acuity and visual field.

There are several methods for measuring contrast sensitivity. In the literature, the best method for testing contrast sensitivity is considered to be the Pelli-Robson chart (Pelli, Robson and Wilkins, 1988; Elliott, Sanderson and Conkey, 1990; Rubin, 1988), but there are several other generally accepted methods. The problem with these methods is that there are no normative data available across these test methods and across measurement centres. This implies that the outcome of one particular test cannot be related to the outcome of other tests and that each measurement centre should develop its own normative database for the results (D.B. Elliott, personal communication). Furthermore, there is no clear cut-off value established for (one of) these tests. Notably, in the European prevalence study (van Rijn et al., 2005) there were marked differences in the

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

prevalence of contrast sensitivity impairments, which should probably be attributed to differences in measurement conditions. This was despite the fact that particular attention was paid to harmonise the experimental setup across participating clinics. Finally, these tests have been developed for the evaluation of disease in a clinical setting. In such a setting, there is no vested interest for the applicant in having a good test outcome. Therefore, little attention has been paid to the “cheat resistance” of the test methods. For example, the Pelli-Robson chart has only three alternatives for each level of testing. This could easily be memorised.

In summary, contrast sensitivity can provide valuable information about the visual capacity of drivers. Before proceeding to implementation, measurement methods and cut-off values should be further developed.

**Glare sensitivity.**

This is the sensitivity to glaring light sources such as a setting sun or the headlights of approaching cars. Subjects with increased glare sensitivity may be more easily blinded in such conditions. Studies on accident statistics of subjects with increased glare sensitivity revealed high relative risk values (von Hebenstreit, 1995; 1984; Lachenmayr et al., 1998 reported relative risk values of, respectively 11.04, 1.59 and 2.42). A major problem is that the number of studies is only small and that the technique for measuring glare sensitivity in those studies is not well developed (van Rijn et al., 2005). Moreover, in those studies, the number of impaired subjects was up to 45% (von Hebenstreit, 1995), disqualifying this technique as a tool for discriminating between impaired and non-impaired drivers. Another study (Owsley et al., 2001) failed to demonstrate a role for glare sensitivity. In an on-road simulation study, Theeuwes et al. (2002) found that headlight glare (mounted on a car) caused decreased recognition of objects along the roads, especially by elderly drivers. Skaar et al. (2003) found that increased glare sensitivity correlated with decreased visual attention in elderly drivers. Simulated cataract, produced by filters (leading only to a mild decrease in visual acuity and selectively affecting glare) appears much more detrimental for driving performance than decreased visual acuity produced by optical blur (Higgins, Wood and Tait, 1998; Wood and Higgins, 1999).

A major problem is that a suitable measurement technique has been lacking, due to the fact that glare sensitivity is largely condition-dependent (Elliott and Bullimore, 1993; van Rijn et al., 2005). Recently, the gold standard for measuring glare sensitivity (straylight measurement) was converted into an instrument that is suitable for use outside research laboratories (Franssen et al., 2005). It is likely that in the near future field experience with this technique will be available so that its applicability for assessing drivers can be more readily judged. This technique has been used in a study into the prevalence of visual impairments among European drivers (van Rijn et al., 2005). It was found that the prevalence of impairments (defined as straylight values above 1.4) is very low at young ages and rises to almost 30% above 75 years of age. However, the adequate cut-off value for this measurement technique still has to be established.

### The Eyesight Working Group

From the studies, cited above, it emerges that glare and straylight may be important parameters of visual function for driving safety. However, before implementation of glare measurements could be considered, the measurement technique should be more thoroughly evaluated and adequate cut-off values should be established.

#### Useful field of view (UFOV).

This parameter may seem somewhat misplaced in this report since it is not a test of 'traditional' visual function. However, UFOV has been shown to be relevant for predicting fitness to drive and because of its relation to visual functions it will be discussed. The UFOV tests the ability to perform simultaneous detection tasks (divided attention) in a visual surrounding crowded with visual distractors. By doing so, it combines a purely visual task with a neuropsychological task of attention. It is tested by a custom-made programme on a personal computer, or by a custom-made test device. In studies on accident statistics, high relative risk values have been reported (Owsley et al., 1998a; 1998b and Sims et al., 1998 reported values of 2.8; 4.2-17.2 and 6.1, respectively). Several studies (e.g. Owsley, et al., 1991; Ball et al., 1993) demonstrated that early dementia and attentional factors in general are very important factors contributing to the unfitness to drive of elderly subjects. The visual attentional component is probably the basis for the observed relation between UFOV tests and driving performance. However, simulated cataract has also been associated with decreased UFOV scores (Wood and Troutbeck, 1995), although the stimulus was such that it should have been seen with low visual acuities. However, since UFOV is not a test of basic visual (ocular) function, the interpretation of the test results is not always straightforward. As Withaar (2000, cited in Tant, 2002) reports, the importance of task-specific experience may blur the direct relation between neuropsychological function (as tested in UFOV) and driving. The authors, promoting the UFOV, have reported that practice enhances UFOV performance but it is unclear whether this has an effect on driving performance and whether the effect is sustained. Roenker et al. (2003) reported that training the speed of processing improved both driving performance (in a simulator) and UFOV score. On the basis of these data, we conclude that the UFOV may be useful as an additional (vision related) test to assess individual drivers. However, due to the difficulty in interpreting the results, it seems at present unsuited to include the test in the European vision Directive.

#### Diplopia

Currently, diplopia is only mentioned in the paragraph for Group 2 drivers. It should be noted that diplopia can be severely disabling and can severely affect driving performance. Long-standing diplopia, especially when present before the age of 10, is influenced by higher cortical function and many people with strabismus report having diplopia, when asked specifically. However, they are able to ignore the second image, in most cases to the extent that they hardly perceive this second image anymore. In contrast, newly developed diplopia in an adult may be incapacitating because these people cannot suppress one image and may not be able to distinguish between the two images. When the diplopia persists for months, in many cases, but not always, some kind of adaptation and suppression of one image occurs so that driving, at least for Group 1 drivers, could be allowed. It is therefore important for newly developed diplopia, to request an adaptation

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

period as well as a complete ophthalmological examination. For Group 2 drivers, driving with diplopia should probably never be allowed. Intermittent patching of one eye during driving (in order to avoid diplopia) is not recommended because it hinders adaptation. Patching of one eye is, however, a useful option when the patch is worn continuously (ie not only during driving). In this case, rules for monocular drivers apply. We note that there is very little literature about diplopia and driving. We know of only one paper that describes a limited number of subjects with acquired diplopia (White et al., 2001). In this small study, there was no difference in driving behaviour (driving simulator) between subjects with long standing acquired diplopia (longer than 6 months) and normal controls.

**Bioptic devices and other visual enhancement devices**

Visual aids may be divided into devices for correcting refractive errors (to focus the image onto the retina) and devices that modify the image in other ways. These latter devices may enlarge the image, to enhance resolution, or they may shrink the image, in order to expand the visual field (e.g. Szlyk et al., 1998). Alternatively, they may change the location of the image (prismatic devices) in order to prevent diplopia or expand the functional visual field (e.g. Szlyk et al., 2005b). Bioptic devices are spectacle-mounted telescopic devices that provide a solution for low visual acuities. Their use for drivers has been advocated by a number of researchers (e.g. Katz, 1991; Politzer, 1995), but fundamental research into their benefits and disadvantages has been scarce (see, e.g. Szlyk et al., 2000). Although bioptics are allowed in many states of the USA, their application remains controversial (e.g. Barron, 1991). The central field of view is enlarged by a telescope in order to enhance resolution. As a result, the user may be able to identify characters that belong to a visual acuity 0.5 standard whereas the acuity, when measured conventionally, is lower. This enlargement of the telescopic image area is at the cost of the introduction of a large ring scotoma when looking through the telescope. The ring scotoma blocks an area 'Magnification x the field of the telescope'. For a common '3 x 12 telescope, this results in a 36 degrees diameter scotoma. Anything outside this area (hence from 36 degrees to the actual peripheral limits of the visual field) remains visible. Therefore, the driver is instructed to look through the telescope selectively only when he/she "needs" a better acuity, particularly for reading road signs. From research into the use of bioptic devices, it appears that there is a large variation in the estimate of the percentage of time that people use them, although the tasks were very similar (Bowers et al., 2005). Some people estimate that they spent a large amount of driving time looking through the telescope but most people hardly used the telescope. According to the instructions, people should look through the telescope no more than 5 to 10% of driving time. However, after passing the driving test wearing the device, most people subsequently rarely look through the telescope at all.

The Eyesight Working Group acknowledges that bioptic devices may be helpful to the individual driver (e.g. Szlyk et al., 2000). However, by allowing bioptics under all conditions, it is felt that visual acuity standards would be significantly lowered at the cost of a severe reduction in visual field. The effect on traffic safety of this reduction may be marked. Notably, depending on the magnification factor of the device, the 0.5 visual acuity standard could be effectively reached even with very low visual acuities but at the



### The Eyesight Working Group

cost of the ring scotoma, as mentioned before. In many states in the United States, reasonable limits are placed on visual acuity *without* bioptics in order to avoid this issue. Analogous to this, we recommend that bioptic devices may be considered only when: 1. the driver demonstrates safe and adequate driving behaviour *without* the use of bioptics **and** 2. it is demonstrated (preferably by a practical driving test) in this individual driver that the use of the bioptic does not interfere with traffic safety. Hence, the bioptic device should not be used to meet the standard, but may be used during driving provided that the subject is well adapted to using the device. Notably, in the United States, a large variation in rules apply in the various states (see, e.g. at [www.lowvision.org](http://www.lowvision.org) for a comprehensive overview. Most states allow bioptics for driving but only 23 states also allow use of the device to meet the visual acuity standard. Fourteen states explicitly forbid this and another 14 states do not mention bioptics. In many states, visual acuity standards are lower than in European countries although, it must be realised, traffic conditions are markedly different). The Eyesight Working Group realizes that, without lowering the current acuity standard, the usefulness of bioptic devices is limited. Bioptic devices may be especially useful with low visual acuities, possibly as low as 0.16. However, the general opinion across the Working Group members is that in the European traffic setting, it is not desirable to lower the acuity standard to such a level.

### Periodic screening of drivers

Having discussed the relationship between driving performance and the various visual functions, and having discussed the problems of the cut-off values, the next question is whether drivers should be periodically screened for impairments of vision and, if so, from what age and at what intervals. In the European Council Directive 91/439/EEC, there are no guidelines regarding periodic testing of drivers. In most member states, however, some form of medical evaluation takes place upon driving-licence renewal either by self-declaration by the driver or by a physician, who can be a general physician or a designated specialist. (see White and O'Neal, 2000 for an overview).

The advantage of screening is obviously the promotion of driving safety by a reduction of the number of fatalities and injuries attributable to functional impairment of the driver. The disadvantage of screening lies in the costs that are involved and the effort that is required of the driver. In the literature, the effectiveness of periodic screening has been doubted. Most knowledge originates from studies comparing traffic safety in drivers with and without in-person renewal of driving licences (Kelsey and Janke, 1983; Zaidel and Hocherman, 1986; Janke, 1990; Grabowski et al., 2004). None of these studies reported any beneficial effect of screening of visual functions. Zaidel and Hocherman (1986) demonstrated that, although 30% of drivers were instructed to start wearing spectacles for driving, only 7% did so as a result of the screening procedure. Janke (1990) reported that driving licence renewal by mail (as opposed to in-person renewal) did not affect traffic safety in subjects with clean driving records (although there was a difference in subjects with previous driving accidents and convictions). Grabowski et al. (2004) reported that in-person driving licence renewal was associated with lower fatality rates in elderly drivers, although vision tests were not beneficial. In a recent study into the prevalence of impairments of visual function in European drivers (van Rijn et al., 2005), the highest prevalence of impairments was found in sub-populations in which screening was mandatory (Spain at any age and The Netherlands beyond the age of 70). Although one

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

could argue that *without* screening, the prevalence would have been still higher, these results cast doubt on the effectiveness of screening of visual functions. Only Shipp and Penchansky (1995) extrapolate to a possible beneficial effect of screening.

Screening should only be imposed if its efficacy and efficiency are well established. The efficacy and efficiency of screening are determined by the prevalence of impairments, the sensitivity and specificity of the tests that are being used and the costs of the screening procedure in relation to its benefits (enhancement of traffic safety). This should preferably be evaluated in a prospective randomized study (see Wormald, 2003 for a comprehensive review). The prevalence of impairments was recently investigated in the European study mentioned above (van Rijn et al., 2005). It was found that the prevalence of impaired visual acuity and visual field is very low at young ages. The prevalence of impaired visual acuity rises to 5% in the highest age groups (consisting of drivers of 75 years of age and older) but the majority of these subjects meet the standards after proper adjustment of their spectacle correction. The prevalence of impairments of visual fields rises to 2.7% in the highest age groups. The prevalence of impairments of contrast sensitivity and glare sensitivity is higher but the cut-off value of those parameters is not yet clearly established. As yet, these visual functions are not included in the European Directive. Screening may be particularly useful to improve spectacle correction amongst drivers since it has been repeatedly found that up to 10% of drivers may have a considerable improvement of visual acuity when their spectacle correction is adjusted. However, it is as yet unknown whether screening of drivers will indeed promote wearing of adequate spectacles, and additionally, if wearing those spectacles will positively influence traffic safety.

In conclusion, screening may be most beneficial for the detection of impaired contrast sensitivity, increased glare sensitivity and possibly reduced Useful Field of View. For these parameters of visual function, no standards are as yet defined. Further research is recommended. Screening for detection of impaired visual acuity and visual field is of limited value since the prevalence of impairments amongst drivers (at least at young ages) is limited. If, due to a desire to harmonise European standards, screening of drivers is to be introduced then we recommend it should only commence at older ages and preferably not before the age of 60.

**Exceptional cases: restricted licences**

Under the current Directive, it is possible to offer a restricted licence to drivers. Codes 05.01 to 05.04 restrict driving respectively to day-time, a certain radius, without passengers or with a speed limit. Additionally, the validity of the licence may be time - limited. There is no guidance as to how these codes or limitations should be applied. We note that the relationship between vision impairments and driving performance is rather weak. The weakness of this relationship is caused by the fact that driving performance is determined multifactorially. Apart from vision, many factors play a role. Vision impairments may sometimes, but not always, be compensated for by (strategic or tactical) behaviour of the driver (Keall and Frith, 2004). Hence, the relation between impairments and activities (e.g. driving) is indirect. (ICF terminology, see e.g. Tant, 2002 for a



## The Eyesight Working Group

discussion of these terms, see also Colenbrander, 2003). That is, the same impairment (e.g. low visual acuity) does not always lead to the same limitation (e.g. practical unfitness to drive) because a (mild) impairment can sometimes be compensated for.

A lowered visual acuity is often accompanied by an impaired contrast sensitivity and/or glare sensitivity. This is particularly true for elderly subjects with cataract, glaucoma or macular degeneration. As has been pointed out above, measurement procedures for contrast sensitivity and glare are not well developed. Therefore, we do not advocate a lowering of the visual acuity standard since this may have the unwanted side effect that subjects with rather severe impairments of contrast sensitivity and/or glare sensitivity will be granted a licence. The consequence of this strategy is that there is a limited number of subjects (e.g. with stable congenital / hereditary disease such as x linked retinoschizis) with suboptimal acuity, but normal contrast sensitivity and glare sensitivity, who are denied a licence, although they could be safe drivers because their 'isolated' mild impairment and preservation of other visual functions facilitates effective compensation. A similar reasoning holds for visual field defects caused by (posterior) brain damage. In many cases, only the visual field is impaired without other visual functions being affected.

For this group, where a mild impairment does not lead to a substantial limitation, we advocate formalising the procedures for restricted licences. Driving performance should be investigated by a practical driving test. Once the subject has demonstrated adequate compensation, a restricted licence may be offered. We note that limitations of vision, such as decreased visual acuity and contrast sensitivity, may particularly affect driving performance during twilight hours. Therefore, restricted licences in subjects with these sight limitations could be issued for day-time hours only. In addition, the driving radius could be limited to limit exposure and to facilitate driving in a familiar setting where unanticipated traffic situations are minimized. The validity in time of the driving licence could be limited in cases of possible progressive impairments. A system like this would, to a large extent, enhance the mobility and social independence of the mildly visually impaired population. Moreover, by requesting a practical driving test and by imposing restrictions and limitations, traffic safety may be optimally safeguarded. However, we emphasise that a restricted licence should be issued in exceptional cases only and following positive expert advice. Moreover, the applicant has to demonstrate adequate driving ability. Notably, the applicant should be tested under the conditions for which a licence is applied. The driving test should be passed in the area of intended driving. This will avoid passing the test in a rural area whereas driving occurs in an urban setting and vice versa. If twilight driving is applied for, this should also be tested. Hence, only in exceptional cases and following positive expert advice and evaluation, can restricted licences be issued to candidate drivers not attaining the visual standard (to be discussed further). Advice and evaluation should be undertaken only by vision and driving experts, preferably in specialised multidisciplinary centres.

As suggested, a restricted licence should be possible only when the visual impairment is moderate and hence if the visual function is just a little below the standard and other visual functions are nearly unimpaired. The consensus amongst the Working Group

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

members is that, when a driver applies for a restricted licence based on suboptimal visual acuity, the actual visual acuity should not be below 0.3 whereas other visual functions, such as contrast sensitivity and glare sensitivity, should be unimpaired (values to be defined). Moreover, the visual field standard must be met in full. Alternatively, when the application is based on a limited visual field, then the actual visual field defect should be outside the central 20 degree area and the standard regarding visual acuity must be met. This field value of 20 degrees is based on the observation that this area is of particular importance for visual perception during driving (Schiefer et al., 2000). Hence, a restricted licence should not be possible when both visual acuity and visual field are below the standard. (Some Working Group members also support the possibility of a restricted licence for those with homonymous visual field defects, caused by brain damage.)

The vision and driving experts decide upon the validity of the driving licence and the potential restrictions. It should be emphasised that, if the applicant challenges the decision, the burden of proof should rest with the applicant. The applicant for a restricted licence should prove that he/she is capable of driving under the conditions for which a licence application is made. We recommend that national specialist centres (or at least a limited number of specialist centres in each country) be responsible for the issuing of restricted licences. These 'fitness to drive centres' should house, amongst others, vision and driving experts. This would facilitate procedures and would generate a large pool of experience in this field. Furthermore, this would allow for future comparison of data for research purposes.

### **Conclusions**

From the studies cited above, it appears that a variety of parameters of visual function is important for safe driving. This holds true particularly for visual field. Contrast sensitivity and, perhaps, glare sensitivity are also very important. Visual acuity, especially if only mildly impaired, seems less important, but we note the majority of conditions that lead to decreased visual acuity also lead to decreased contrast sensitivity and increased glare sensitivity. As we noted, measurement of contrast sensitivity and, particularly glare sensitivity is less straightforward than measurement of visual acuity, since we lack knowledge about adequate cut-off values and about the prevalence of impairments in the driving population. As long as adequate testing for contrast sensitivity and/or glare sensitivity is not included in the standards then it is advisable not to underestimate the role of visual acuity measurements.

Regarding the actual cut-off values, we have remarked that research data are lacking for various reasons. The recommendations that follow in the next paragraph are therefore based on reasoning, common sense and practical experience. It is advisable that research is performed specifically into the issue of cut-off values. Awaiting the results of such investigations, we feel that some recommendations can however be made.

### **Principles of testing**

- 1) Parameters should be defined in terms of visual function, not in terms of test outcomes.

## The Eyesight Working Group

- 2) Parameters should be defined in terms of visual function, not in terms of ocular disease.
- 3) The term “normal” should not be used.
- 4) Parameters should be defined binocularly. When defined monocularly, this should be justified.
- 5) Test parameters should be clearly defined in order to avoid ambiguity.
- 6) The majority of the tests should be laboratory tests, in order to avoid frequent on-road testing procedures.

***Current guidelines and proposed changes***

In the paragraphs below, the headings represent the current European Directive. Each heading is followed by a discussion of problems and recommendations

**Group 1****1) The binocular visual acuity should be 0.5 or better.**

- a) Problem
  - i) The rationale for this cut-off value has not been properly justified.
- b) Recommendation
  - i) Depending on the contrast sensitivity and glare sensitivity of the driver and on the road and traffic conditions, the standard of 0.5 for visual acuity may be too strict (daytime driving in a subject with non-impaired contrast and glare sensitivity) or too lenient (night-time driving in a subject with early cataract) (Elliott et al., 1996) We emphasise that the effects of lowered contrast sensitivity and increased glare sensitivity can be such that visual performance may be drastically reduced, depending on sight conditions. Therefore, even whilst 0.5 is probably a rather high standard, it should not be lowered until adequate testing procedures for contrast sensitivity and, possibly, glare sensitivity, are available.

**2) The horizontal visual field should be at least 120 degrees**

- a) Problems
  - i) This cut-off value has not been properly justified
  - ii) There are no requirements for the left/right/up/down extension of the visual field
  - iii) There are no guidelines for the testing method
  - iv) There are no requirements regarding the absence of/allowance of sporadic defects
  - v) There are no rules regarding the number of attempts a candidate is allowed to make.
- b) Recommendations
  - i) Many studies demonstrate the importance of an adequate visual field for driving, however, adequate cut-off values have not been published. Awaiting studies in this field, there is no current basis for change of this standard. Additional research is recommended.
  - ii) The solitary requirement for the horizontal extension of the visual field does not exclude the possibility of important extensive visual field defects above

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

and below this meridian, defects of significant importance in traffic. Although, as pointed out, scientific data to support figures concerning the recommended extension are lacking, it is reasonable to propose that the visual field should extend to 20 degrees above and below the horizontal meridian. Likewise, the field must not be too limited on either side of the fixation point. We therefore suggest a minimum of 50 degrees to the right and to the left.

- iii) For an adequate examination of a candidate's visual field, it is necessary to perform perimetry. This test is costly, since it requires rather expensive equipment. It is also time consuming. Since the prevalence of visual field defects in the driving population is rather low, it may not be necessary to test all driving licence applicants by perimetry. It could be sufficient to test only those individuals in whom defects could be anticipated. Those individuals, should preferably be tested by a 'traffic perimetry algorithm'. This should comprise a sufficient number of test points (e.g. 100) within the area of interest (i.e.,  $120 \times 40^\circ$ ), from which a sufficient number of points (e.g. 25) is located within the central 20 degrees (radius). Their luminance should be related to that of the hill of vision, i.e., with increasing intensity towards the periphery. The luminance should be at a certain supra-threshold level; we suggest 8 dB above the threshold for older people (e.g. 80-years old). Visual fields could be measured binocularly (ie with both eyes together). When visual fields are measured monocularly, only defects that are overlapping, i.e. at the identical location in both eyes, should be considered. Visual field defects that are not overlapping (a visual field defect in one eye with no defect at the identical location in the fellow eye) are less relevant for driving. With such a test available, it would be possible to lay down the number of missed test points, centrally as well as peripherally, acceptable for a licence (see at iv)).
- iv) Within the suggested  $120 \times 40^\circ$  area, isolated field defects (depressions, scotomas) may appear, e.g. due to glaucoma or chorioretinitis. If of a certain depth and size, they might be of significance in traffic. There are no data suggesting the maximum number, size and depth of such defects. Monocular drivers are (as far as we know) not hampered by the Physiological Blind Spot. Therefore a comparable scotoma in the binocular visual field could be allowed. It is reasonable that scotomas within the central  $20^\circ$  (an area with a diameter of  $40^\circ$  with the fixation point in the centre) are of greater importance than scotomas outside this area (Schiefer et al., 2000). Any more detailed specification brings with it ambiguities, especially since the characteristics of the scotomas depend on the method used to define them. We therefore suggest that isolated defects be judged on an individual basis by a panel of specialists (possibly in a national expert centre, see section on restricted licences). We realise that, from a practical point of view, it may be impossible for all isolated defects to be judged on an individual basis. We therefore suggest that some rough guidelines should be developed to discriminate between those defects that are allowed and those that should be referred to a specialist centre for further judgement. These guidelines could, for example, be as follows: *with the method of testing, suggested at iii), within the central 20 degrees of*

## The Eyesight Working Group

*visual field (radius) no more than 2 relative defects should be present. When these defects are related to the Physiologic Blind Spot, these defects may be absolute. Within the 120 (horizontal) x 40 (vertical) degrees visual field area, no more than 7 relative visual field defects should be present. It should be noted that these criteria could only provide a rough guide to the judgement of visual modalities. We strongly advocate further research in this field to further justify these criteria. It should be realised that relative defects are sensitive to refractive errors. Therefore, prior to testing, refractive errors should be adequately corrected. Moreover, relative defects in peripheral visual field areas may be generated by spectacles and spectacle frames. It is common practice for diagnostic tests to test peripheral visual field areas without spectacle correction, in order to avoid inadvertent measurement of visual field defects, but this does not reflect the actual situation during driving.*

- v) We know that visual field testing results may be variable; first time testing often has worse results than repeated tests (e.g. Parrish, Schiffmann and Anderson, 1984; Lewis et al., 1986). Therefore, one has to allow for repeated testing in case of doubt. The adequacy of the test results may be judged by an expert.
- 3) **No progressive eye disease should be present, when a progressive eye disease is present, regular check-ups are requested.**
  - a) Problem
    - i) None, this is an adequate standard
  - b) Recommendation
    - i) None
- 4) **In case of total functional loss of vision in one eye, the visual acuity must be at least 0.6.**
  - a) Problem
    - i) This is an ambiguous standard since, for example, mere light perception in the fellow eye is not useful for driving, but is not absolute blindness.
    - ii) No functional difference is anticipated between monocular and binocular drivers, other than in functions that are not tested for, such as stereo-acuity.
  - b) Recommendation
    - i) No special requirements for the monocular driver: this paragraph could be omitted.
- 5) **There are no requirements for twilight vision, other than in cases of doubt.**
  - a) Problem
    - i) Tests for twilight vision may supply useful information about driving capacity.
  - b) Recommendation
    - i) There is no clarity regarding the cut-off value and methodology of measurement for contrast sensitivity and the cut-off values for glare sensitivity. However, it is likely that impairments of twilight vision are an important factor in road safety. Therefore, future introduction of requirements regarding twilight vision should be made possible and anticipated, after proper research has been performed.

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

**6) There are no requirements for the absence of diplopia**

- a) Problem
  - i) Diplopia may lead to severe confusion of images during driving. Note that adaptation is possible in many cases and that severely disabling persisting diplopia is rare.
- b) Recommendation
  - i) Formulate a requirement regarding diplopia e.g. no severely disabling diplopia should be present. Any recently developed diplopia should lead to an adaptation period of at least 6 months, during which driving is not allowed. After this period, driving is only allowed after favourable support of vision and driving experts, suggesting that the diplopia is not disabling. Intermittent patching of one eye during driving (in order to avoid diplopia) is not recommended as it limits adaptive processes. Patching of one eye is an acceptable option when the patch is being worn continuously (hence not only during driving). In this case, rules for monocular drivers apply.

**Group 2****1) The visual acuity should be at least 0.8 in the best eye, 0.5 in the fellow eye.**

- a) Problem
  - i) The visual acuity requirement for the fellow eye is insufficiently justified. One may argue that driving is a binocular activity and therefore no requirements for monocular visual acuity should be formulated. However, one may also argue that, in view of the greater responsibility of Group 2 drivers, a spare eye should be present. Even if one should require a spare eye, it is safe to assume that with a visual acuity of 0.1 in this spare eye, a driver should be able to stop the truck or bus at the side of the road.
  - ii) The cut-off value of 0.8 in the better eye is arbitrary, although we consider it reasonable in Group 2 drivers to expect that the visual acuity is normal or near normal.
- b) Recommendation
  - i) We recommend changing the visual acuity requirement in the fellow eye from 0.5 to 0.1.
  - ii) We recommend no change to the standard of 0.8 in the better eye.

**2) Glasses should be +/- 8 dioptres or less**

- a) Problem
  - i) This requirement is not formulated in terms of visual function and therefore it may lead to ambiguities. The ring scotoma that results from +8 Dioptre glasses depends on the shape of the glasses, the distance of the glass to the eye and on the shape and thickness of the spectacle frame. Therefore, the visual field restrictions that result from these glasses largely vary between subjects. Notably, most +8 Dioptre spectacles will result in visual field defects well within the 120 degree area. However, at present insufficient knowledge is available to formulate a justifiable change of this requirement. In contrast, -8 Dioptre glasses will not result in a ring scotoma.
- b) Recommendation

## The Eyesight Working Group

- i) The -8 requirement could be abolished. No requirements for the strength of minus lenses need to be formulated. We note that severe myopia leads to decreased visual acuity and contrast sensitivity (Risse et al., 1996), but these visual functions could be tested separately.
  - ii) The +8 requirement requires further research. Possibly, in the future, this requirement may be formulated more precisely (e.g. +8 dioptrre glasses are only allowed if, with the glasses, adequate visual fields can be demonstrated).
- 3) Normal visual fields should be present in both eyes.**
  - a) Problems
    - i) The term “normal” is ambiguous since the extent of the visual field depends on the shape of the face. Hence a “normal” visual field in one subject may in fact be smaller than an “impaired” visual field in another subject.
    - ii) One may argue that driving is a binocular activity, therefore no monocular visual field requirements should be formulated. Even in terms of a spare eye (potentially necessary for stopping the car in case of emergency) no monocular visual field requirements are necessary.
    - iii) The cut-off value is arbitrary, although it is reasonable to expect from a truck or bus driver that the visual field is unimpaired.
    - iv) There are no guidelines for the testing method.
    - v) There are no rules for the number of attempts a subject is allowed to make.
  - b) Recommendations
    - i) Formulate the visual field requirements in terms of numbers, e.g. horizontal visual field should be 160 degrees, the extension should be at least 70 degrees left and right and 30 degrees up and down. No defects should be present within central 30 degrees (not even the Physiologic Blind Spot). The exact numbers should follow from future research.
    - ii) The requirements are for binocular visual fields, see section on Group 1 drivers.
    - iii) See at i)
    - iv) See at section on Group 1 drivers. The method for Group 2 drivers may be similar, though the reference age may be different, e.g. 70 years of age. This would effectively request that a Group 2 driver has a sensitivity throughout the visual field that is not more than 8 dB worse than the normal sensitivity of a 70 year old subject. The actual requirements require further research.
    - v) See section on Group 1 drivers.
- 4) No requirements for twilight vision (contrast sensitivity and/or glare sensitivity) are included.**
  - a) Problem
    - i) Twilight vision may provide useful information about driving capacity
  - b) Recommendation
    - i) There is no clarity regarding the cut-off value and methodology of measurement for contrast sensitivity and the cut-off values for glare sensitivity. However, it is likely that impairments of twilight vision are an important factor for adequate driving performance. Therefore, future introduction of requirements for twilight vision should be made possible and anticipated, after proper research has been performed. In the opinion of the

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

Working Group, it is reasonable to expect unimpaired contrast sensitivity in a Group 2 driver. Future research should reveal how this will translate into the outcome measures of visual function tests.

**5) Requirements for the absence of diplopia are scarcely formulated.**

- a) Problem
  - i) Diplopia may lead to severe confusion of images during driving. Note that adaptation is possible in many cases and that severe, disabling persisting diplopia is rare.
- b) Recommendation
  - i) Although driving could probably be allowed for drivers with long-standing, non-disabling diplopia, research on this issue is scarce. We recommend not changing the current standard. (i.e. we recommend that Group 2 drivers should not have diplopia).

**General**

**1) There are no requirements for periodic testing nor on procedures in case of the development of eye disease between testing periods.**

- a) Problem:
  - i) Eye disease that occurs after the licence has been granted will not be detected and any gradual decrease in visual functions will remain unnoticed.
  - ii) Even if a person knows that she/he has developed an eye disease, there is currently no obligation to inform the authorities and be tested.
- b) Recommendation
  - i) Research is advised into the efficacy and efficiency of periodic screening. The questions to be answered concern the prevalence of impairments (currently being studied), the specificity of testing and cost of screening procedures in relation to the costs of accidents. This should preferably be evaluated in a prospective randomised study. If screening is implemented, based on current knowledge, then we recommend starting at a rather late age for Group 1 drivers and not before the age of 60. For Group 2 drivers, testing at a younger ages may be considered, as well as a test at the first application for the driving licence.
  - ii) In cases of newly developed ocular disease or decrease in vision, drivers should be examined or re-examined. It should be the responsibility of drivers to make sure that the visual function requirements are met (e.g. by checking with their ophthalmologist). In cases of doubt, a full ophthalmological assessment should be performed.

**2) There is a difference between screening (aimed at detection of disease) and testing (aiming at measuring known abnormalities)**

- a) Problems
  - i) Applying testing programmes to a normal population may be costly and lead to a large number of false positives
  - ii) Applying screening programmes to subjects with known abnormalities may lead to false negatives
- b) Recommendation.



## The Eyesight Working Group

- i) The requirements that are formulated above are applicable for testing subjects with known abnormalities. The conditions for screening need to be formulated. For example:
    - (1) Measure visual acuity of both eyes with habitual spectacles
    - (2) Measure visual field with a suprathreshold screening programme.
    - (3) If any abnormalities are found, refer for a testing programme.
- 3) **There is no adaptation period following newly developed eye disorders.**
  - a) Problem.
    - i) For example: after trauma in which a subject loses one eye, the requirements regarding Group I licences are still met. However, in the immediate aftermath of the trauma, the subject may not be capable of driving safely due to adaptation problems, but driving capacity may be regained (Edwards and Schachat, 1991). The same applies to the occurrence of diplopia after brain disease.
  - b) Recommendation
    - i) Formulate a standard as follows: (Group I) after the loss of vision in one eye or after newly developed diplopia, there should be an adaptation period of at least 6 months during which the subject is not allowed to drive. (Group II) after substantial loss of vision in one eye (and the driver still meeting the requirements) there should be an adaptation period of at least 6 months during which the subject is not allowed to drive. In both cases, the driver is obliged to check with their ophthalmologist whether the requirements are still met. In case of doubt, a full ophthalmological assessment should be performed.
- 4) **There is only a limited opportunity for a restricted licence (exceptional cases).**
  - a) Problem
    - i) In some drivers, mild perceptual defects may be compensated for by adaptive driving behaviour. These drivers may not adversely affect traffic safety, whereas stopping them from driving would introduce a large social handicap. Such compensation may occur both for visual acuity and visual field defects.
    - ii) In some subjects with stable sub-optimal visual acuity and normal contrast sensitivity and glare sensitivity, this standard of 0.5 may be too strict.
    - iii) The experience with restricted licences in member states is limited and decentralized.
  - b) Recommendation
    - i) and ii) Allow the possibility of issuing a restricted licence for Group I drivers when visual acuity is between 0.5 and 0.3 or, alternatively, when visual field defects are present outside the central 20 degrees area, in both cases subject also to favourable support from vision and driving experts. The applicant should demonstrate adequate driving performance in the conditions for which the licence application is made. This implies that also a practical driving test should be performed. In practice, this could imply that an elderly subject with impaired visual acuity (and no significant impairments of contrast sensitivity and glare) is granted a licence with restrictions to day-time hours and to a certain radius. A young subject with a stable congenital disease may be, for example, granted a licence with day time restrictions, but without any limits to exposure, depending on expert advice. A restricted licence should not be

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

issued when the visual acuity is below 0.3 or when visual field defects are present within the central 20 degrees of visual field (radius). (As has been mentioned above, some members of the Working Group support the possibility of a restricted licence for subjects with homonymous hemianopia due to brain damage). A restricted licence should not be possible when both visual acuity and visual field are below the standard.

ii) See at i).

iii) The Working Group advocate the establishment of national specialist centres to deal with the issuing of restricted licences. These 'fitness to drive centres' should house, amongst others, vision and driving experts.

**5) There is a pressure from interest groups to allow driving with Bioptic devices.**

**a) Problem**

i) Driving with bioptics allows the driver to meet the standard of visual acuity (when looking through the telescope device) or meet the standard of visual field (when looking past the telescope device). Hence, they do not meet both standards at all times. Apart from this, it is likely that in selected subjects, a bioptic device may be a useful tool to enhance visual performance during driving.

**b) Recommendation**

i) A bioptic device may be a useful tool during driving. Its application should only be considered when the driver has demonstrated that its use does not interfere with driving performance (i.e. that the driver is well adapted to using the device) e.g. by a practical driving test. Bioptic devices should not be used for the purpose of meeting the standards on vision. Hence the standards should be met without the bioptic device.

## References

- Anderson, R. S.; McDowell, D. R., and Ennis, F. A. Effect of localized defocus on detection thresholds for different sized targets in the fovea and periphery. *Acta Ophthalmol Scand.* 2001 Feb; 79(1):60-3.
- Anderson, S. J. and Holliday, I. E. Night driving: effects of glare from vehicle headlights on motion perception. *Ophthalmic Physiol Opt.* 1995; 15(6):545-51.
- Ball, K.; Owsley, C.; Sloane, M. E.; Roenker, D. L., and Bruni, J. R. Visual attention problems as a predictor of vehicle crashes in older drivers. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 1993; 34(11):3110-23.
- Barron, C. Biopic telescopic spectacles for motor vehicle driving. *J Am Optom Assoc.* 1991 Jan; 62(1):37-41.
- Bowers, A. R.; Apfelbaum, D. H., and Peli, E. Biopic telescopes meet the needs of drivers with moderate visual acuity loss. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2005 Jan; 46(1):66-74.
- Brown, B. and Lovie-Kitchin, J. E. High and low contrast acuity and clinical contrast sensitivity tested in a normal population. *Optom Vis Sci.* 1989; 66(7):467-473.

## The Eyesight Working Group

- Burg, a. Vision and driving: a report on research. *Human Factors*. 1971; 13:79-87.
- Coeckelbergh, T. R.; Brouwer, W. H.; Cornelissen, F. W.; Van Wolffelaar, P., and Kooijman, A. C. The effect of visual field defects on driving performance: a driving simulator study. *Arch Ophthalmol*. 2002 Nov; 120(11):1509-16.
- Colenbrander, A: Aspects of vision loss – visual functions and functional vision, I: VIR vol., 5, nr. 3, 2003, s. 115-136, Taylor & Francis, Holland
- Coffey, M.; Reidy, A.; Wormald, R.; Xian, W. X.; Wright, L., and Courtney, P. Prevalence of glaucoma in the west of Ireland. *Br J Ophthalmol*. 1993 Jan; 77(1):17-21.
- Council Directive 91/439/EEC of 29 July 1991 on driving licences. Official Journal of the European Communities, L 237, Vol 34, 24 August 1991. L-2985 ed. Luxembourg: Office for official publications of the European Communities.
- Crabb, D. P.; Fitzke, F. W.; Hitchings, R. A., and Viswanathan, A. C. A practical approach to measuring the visual field component of fitness to drive. *Br J Ophthalmol*. 2004 Sep; 88(9):1191-6.
- Decina, L. E. and Staplin, L. Retrospective evaluation of alternative vision screening criteria for older and younger drivers. *Accid Anal Prev*. 1993 Jun; 25(3):267-75.
- Dellinger, A. M.; Langlois, J. A., and Li, G. Fatal crashes among older drivers: decomposition of rates into contributing factors. *Am J Epidemiol*. 2002 Feb 1; 155(3):234-41.
- Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft. Empfehlungen der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft zur Fahreignungen für den Strassenverkehr. Heidelberg; 1999.
- Dielemans, I.; Vingerling, J. R.; Wolfs, R. C.; Hofman, A.; Grobbee, D. E., and de Jong, P. T. The prevalence of primary open-angle glaucoma in a population-based study in The Netherlands. The Rotterdam Study. *Ophthalmology*. 1994 Nov; 101(11):1851-5.
- Dunne, M and Styles, D Wardell P Stylianou L Sprakes R. Driver vision screening: Pilot study. In: *Vision in Vehicles*, VI. Gale, A.G; Brown, I.D. Haslegrave, C. M., and Taylor, S. P. (eds) Amsterdam: Elsevier; 1998; pp. 343-352.
- Edwards, M. G. and Schachat, A. P. Impact of enucleation for choroidal melanoma on the performance of vision-dependent activities. *Arch Ophthalmol*. 1991 Apr; 109(4):519-21.
- Elliott, D. B. and Bullimore, M. A. Assessing the reliability, discriminative ability, and validity of disability glare tests. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1993; 34:108-119.
- Elliott, D. B.; Bullimore, M. A.; Patla, A. E., and Whitaker, D. Effect of a cataract simulation on clinical and real world vision. *Br J Ophthalmol*. 1996 Sep; 80(9):799-804.
- Elliott, D. B.; Sanderson, K., and Conkey, A. The reliability of the Pelli-Robson contrast sensitivity chart. *Ophthalmic Physiol Opt*. 1990; 10(1):21-24.
- Elliott, D. B. and Sheridan, M. The use of accurate visual acuity measurements in clinical anti-cataract formulation trials. *Ophthalmic Physiol Opt*. 1988; 8(4):397-401.

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

- Foley, D. J.; Wallace, R. B., and Eberhard, J. Risk factors for motor vehicle crashes among older drivers in a rural community. *J Am Geriatr Soc.* 1995 Jul; 43(7):776-81.
- Fonda, G. Legal blindness can be compatible with safe driving. *Ophthalmology.* 1989 Oct; 96(10):1457-9.
- Franssen, L. Coppens JE De Wit GC and van den Berg TJTP Measuring glare sensitivity. In van den Berg T. J. T. P.; van Rijn, L. J.; Grabner, G; Wilhelm, H, and Michael, R and others. Relevance of glare sensitivity and impairment of visual function among European drivers. Joint research project supported by the European Commission SUB-B27020B-E3-GLARE-2002-S07. 18091. 2005. 2005.
- Gibson, J. M.; Rosenthal, A. R., and Lavery, J. A study of the prevalence of eye disease in the elderly in an English community. *Trans Ophthalmol Soc U K.* 1985; 104 ( Pt 2):196-203.
- Gilhotra, J. S.; Mitchell, P.; Healey, P. R.; Cumming, R. G., and Currie, J. Homonymous visual field defects and stroke in an older population. *Stroke.* 2002 Oct; 33(10):2417-20.
- Grabowski, D. C.; Campbell, C. M., and Morrissey, M. A. Elderly licensure laws and motor vehicle fatalities. *JAMA.* 2004 Jun 16; 291(23):2840-6.
- Gresset, J. and Meyer, F. Risk of automobile accidents among elderly drivers with impairments or chronic diseases. *Can J Public Health.* 1994 Jul-1994 Aug 31; 85(4):282-5.
- Haas, A.; Flammer, J., and Schneider, U. Influence of age on the visual fields of normal subjects. *Am J Ophthalmol.* 1986; 101(2):199-203.
- Haegerstrom-Portnoy, G.; Schneck, M. E., and Brabyn, J. A. Seeing into old age: vision function beyond acuity. *Optom Vis Sci.* 1999 Mar; 76(3):141-58.
- Hawkins, B. S. Reliability of visual acuity measurements and screening under field conditions. *Ophthalmic Epidemiol.* 1995 Jun; 2(2):99-106.
- Hedin. A. and Lövsund, P. VIII.4 Effect of visual field defects on driving performance. *Doc Ophthalmol Proc Ser.* 1986; 49:541-547.
- Higgins, K. E.; Wood, J., and Tait, A. Vision and driving: selective effect of optical blur on different driving tasks. *Hum Factors.* 1998 Jun; 40(2):224-32.
- Hills, B. L. and Burg, A. a reanalysis of California drivers vision data: general findings. *TRRL Report 768.* 1977.
- Hirvelä, H.; Luukinen, H., and Laatikainen, L. Prevalence and risk factors of lens opacities in the elderly in Finland. A population-based study. *Ophthalmology.* 1995 Jan; 102 (1):108-17.
- Hofstetter, H. W. Visual acuity and highway accidents. *J Am Optom Assoc.* 1976 Jul; 47(7):887-93.
- Holland, C. A. and Rabbitt, P. M. A. Peoples awareness of their age related sensory and cognitive defects and the implications for road safety. *Applied Cognitive Psychology.* 6.
- Ivers, R. Q.; Mitchell, P., and Cumming, R. G. Visual function tests, eye disease and symptoms

## The Eyesight Working Group

- of visual disability: a population-based assessment. *Clin Experiment Ophthalmol*. 2000 Feb; 28(1):41-7.
- Jaffe, G. J.; Alvarado, J. A., and Juster, R. P. Age-related changes of the normal visual field. *Arch Ophthalmol*. 1986; 104(7):1021-5; ISSN: 0003-9950.
- Janke, M. K. Safety effects of relaxing California's clean-record requirement for driver license renewal by mail. *Accid Anal Prev*. 1990 Aug; 22(4):335-49.
- Johnson, C. A. and Keltner, J. L. Incidence of visual field loss in 20,000 eyes and its relationship to driving performance. *Arch Ophthalmol* 1983 Mar;101(3):371-5.
- Johnson, L. N. and Baloh, F. G. The accuracy of confrontation visual field test in comparison with automated perimetry. *J Natl Med Assoc*. 1991 Oct; 83(10):895-8.
- Katz, A. The use of bioptic telescope system for driving. In: *Vision in Vehicles, III*. Gale, A.G.; Brown, I.D.; Haslegrave, C.M.; Moorhead, I and Taylor, S.P. (eds). Amsterdam: Elsevier North Holland; 1991; pp. 229-237.
- Katz, J. and Sommer, A. Screening for glaucomatous visual field loss. The effect of patient reliability. *Ophthalmology*. 1990 Aug; 97 (8):1032-7.
- Keall, M. D. and Frith, W. J. Older driver crash rates in relation to type and quantity of travel. *Traffic Inj Prev*. 2004 Mar; 5(1):26-36.
- Keeffe, J. E.; Jin, C. F.; Weih, L. M.; McCarty, C. A., and Taylor, H. R. Vision impairment and older drivers: who's driving? *Br J Ophthalmol*. 2002 Oct; 86(10):1118-21.
- Kelsey, S. L.; Janke, M. K. Driver License Renewal By Mail in California. *Journal of Safety Research*, 14, 65-82, 1983.
- Klein, B. E.; Klein, R.; Sponsel, W. E.; Franke, T.; Cantor, L. B.; Martone, J., and Menage, M. J. Prevalence of glaucoma. The beaver dam eye study. *Ophthalmology* 1992 Oct;99(10):1499-504. 1992.
- Kleiner, R. C.; Enger, C.; Alexander, M. F., and Fine, S. L. Contrast sensitivity in age-related macular degeneration. *Arch Ophthalmol*. 1988 Jan; 106(1):55-7.
- Kuyk, T.; Elliott, J. L., and Fuhr, P. S. Visual correlates of mobility in real world settings in older adults with low vision. *Optom Vis Sci*. 1998 Jul; 75(7):538-47.
- Lachenmayr, B.; Berger, J.; Buser, A., and Keller, O. (Institut für Mathematik und Datenverarbeitung, Universitätskrankenhaus Eppendorf, Hamburg). Reziertes Sehvermögen führt zu erhöhtem Unfallrisiko im Strassenverkehr. *Ophthalmologie*. 1998 Jan; 95(1):44-50; ISSN: 0941-293X.
- Lamble, D.; Summala, H., and Hyvarinen, L. Driving performance of drivers with impaired central visual field acuity. *Accid Anal Prev*. 2002 Sep; 34(5):711-6.
- Lewis, R. A.; Johnson, C. A.; Keltner, J. L., and Labermeier, P. K. Variability of quantitative automated perimetry in normal observers. *Ophthalmology*. 1986 Jul; 93(7):878-81.

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

- Lovie-Kitchin J, Mainstone J Robinson J Brown B. What areas of the visual field are important for good mobility in low vision patients? *Clin Vision Sci.* 1990; 4249-63.
- Lövsund, P.; Hedin, A., and Tornros, J. Effects on driving performance of visual field defects: a driving simulator study. *Accid Anal Prev.* 1991 Aug; 23(4):331-42.
- Mäntyjärvi, M. and Tuppurainen, K. Cataract in traffic. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol.* 1999 Apr; 237(4):278-82.
- Marottoli, R. A.; Richardson, E. D.; Stowe, M. H.; Miller, E. G.; Brass, L. M.; Cooney, L. M. Jr, and Tinetti, M. E. Development of a test battery to identify older drivers at risk for self-reported adverse driving events. *J Am Geriatr Soc.* 1998 May; 46(5):562-8.
- Massie, D. L.; Green, P. E., and Campbell, K. L. (University of Michigan, Transportation Research Institute, Ann Arbor 48109-2150, Usa). Crash involvement rates by driver gender and the role of average annual mileage. *Accid Anal Prev* 1997 Sep; 29(5):675-85.
- Mönestam, E. and Wachtmeister, L. Impact of cataract surgery on car driving: a population based study in Sweden. *Br J Ophthalmol.* 1997 Jan; 81(1):16-22.
- Nelson-Quigg, J. M.; Cello, K., and Johnson, C. A. Predicting binocular visual field sensitivity from monocular visual field results. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2000 Jul; 41(8):2212-21.
- Owsley, C.; Ball, K.; McGwin, G. Jr; Sloane, M. E.; Roenker, D. L.; White, M. F., and Overley, E. T. Visual processing impairment and risk of motor vehicle crash among older adults. *JAMA.* 1998a; 279(14):1083-8.
- Owsley, C.; Ball, K.; Sloane, M. E.; Roenker, D. L., and Bruni, J. R. Visual/cognitive correlates of vehicle accidents in older drivers. *Psychol Aging.* 1991; 6403-15.
- Owsley, C.; McGwin, G. Jr, and Ball, K. (Department of Ophthalmology, School of Medicine, University of Alabama at Birmingham, USA. [owsley@eyes.uab.edu](mailto:owsley@eyes.uab.edu)). Vision impairment, eye disease, and injurious motor vehicle crashes in the elderly. *Ophthalmic Epidemiol.* 1998b; 5(2):101-13.
- Owsley, C.; McGwin, G. Jr; Sloane, M.; Wells, J.; Stalvey, B. T., and Gauthreaux, S. Impact of cataract surgery on motor vehicle crash involvement by older adults. *JAMA.* 2002 Aug 21; 288(7):841-9.
- Owsley, C.; Stalvey, B.; Wells, J., and Sloane, M. E. (Department of Ophthalmology, School of Medicine/Eye Foundation Hospital, University of Alabama at Birmingham, 35294-0009, USA. [owsley@eyes.uab.edu](mailto:owsley@eyes.uab.edu)). Older drivers and cataract: driving habits and crash risk. *Journals of Gerontology.* 1999 Apr; Series A, Biological Sciences & Medical Sciences. 54(4):M203-11.
- Owsley, C.; Stalvey, B. T.; Wells, J.; Sloane, M. E., and McGwin, G. Jr. Visual risk factors for crash involvement in older drivers with cataract. *Arch Ophthalmol.* 2001 Jun; 119(6):881-7.
- Parrish, R. K. 2nd; Schiffman, J., and Anderson, D. R. Static and kinetic visual field testing. Reproducibility in normal volunteers. *Arch Ophthalmol.* 1984 Oct; 102(10):1497-502.

## The Eyesight Working Group

- Pauleikhoff, D.; Wormald, R. P.; Wright, L.; Wessing, A., and Bird, A. C. Macular disease in an elderly population. *Ger J Ophthalmol*. 1992; 1(1):12-5.
- Peli, E. 2004 Driving with bioptic devices. Invited lecture at the Netherlands Ophthalmological society annual meeting march 2004 Amsterdam. 2004.
- Pelli, D. G.; Robson, J. G., and Wilkins, A. J. The design of a new letter chart for measuring contrast sensitivity. *Clin. Vision Sci*. 1988; 2187-199.
- Pfaff, D. S. and Werner, J. S. Effect of cataract surgery on contrast sensitivity and glare in patients with 20/50 or better Snellen acuity. *J Cataract & Refract Surg* . 1994; 20(6):620-5.
- Politzer, M. R. Vision rehabilitation therapy for the bioptic driver. *J Am Optom Assoc*. 1995 Jan; 66(1):18-24.
- Puell, M. C.; Palomo, C.; Sanchez-Ramos, C., and Villena, C. Mesopic contrast sensitivity in the presence or absence of glare in a large driver population. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2004 Jul 28.
- Rabineau, P. A. and Flammer, J. [Sources of error in automated static perimetry]. *Klin Monatsbl Augenheilkd*. 1989 May; 194(5):307-19.
- Ramrattan, R. S.; Wolfs, R. C.; Panda-Jonas, S.; Jonas, J. B.; Bakker, D.; Pols, H. A.; Hofman, A., and de Jong, P. T. Prevalence and causes of visual field loss in the elderly and associations with impairment in daily functioning: the Rotterdam Study. *Arch Ophthalmol*. 2001 Dec; 119(12):1788-94.
- Risse, J. F.; Saint-Blancat, P.; Boissonnot, M., and Grillot, L. [Spatial contrast sensitivity in patients with severe myopia]. *J Fr Ophtalmol*. 1996; 19(4):271-7.
- Rockwell, T.H. Skills, judgement and information acquisition during driving. In: Forbes, T.W. (ed) *Human Factors in Highway Traffic Safety Research*. New York: Wiley-Interscience 1972, p133-164.
- Roenker, D. L.; Cissell, G. M.; Ball, K. K.; Wadley, V. G., and Edwards, J. D. Speed-of-processing and driving simulator training result in improved driving performance. *Hum Factors*. 2003 Summer; 45(2):218-33.
- Rubin, G. S. Reliability and sensitivity of clinical contrast sensitivity tests. *Clin. Vision Sci*. 1988; 2169-177.
- Rubin, G. S.; Adamson, I. A., and Stark, W. j. Comparison of acuity, contrast sensitivity and disability glare before and after cataract surgery. *Arch Ophthalmol*. 1993; 11156-61.
- Ryan, G. A.; Legge, M., and Rosman, D. Age related changes in drivers' crash risk and crash type. *Accid Anal Prev*. 1998 May; 30(3):379-87.
- Schiefer, U.; Hofer, R.; Vischer, P. M., and Wilhelm, H. Perimetry findings and driving performance. "How much visual field" does a motorist need? (translated title). *Ophthalmologie*. 2000 Jul; 97(7):491-7.

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

- Shahinfar S; Johnson LN, and Madsen RW. Confrontation visual field loss as a function of decibel sensitivity. *Ophthalmology*. 1995 Jun; 102(0161-6420):872-7.
- Shipp, M. D. and Penchansky, R. Vision testing and the elderly driver: is there a problem meriting policy change? *J Am Optom Assoc*. 1995 Jun; 66(6):343-51.
- Sims, R. V.; Owsley, C.; Allman, R. M.; Ball, K., and Smoot, T. M. A preliminary assessment of the medical and functional factors associated with vehicle crashes by older adults . *J Am Geriatr Soc* . 1998; 46(5):556-61.
- Skaar, N. Rizzo M. & Stierman L. 2003 Glare disability with attention impairment Abstract *Journal of Vision* 3 9 719a <http://www.journalofvision.org/3/9/719/>.
- Stutts, J. C. and Martell, C. Older driver population and crash involvement trends, 1974-1988. *Accid Anal Prev*. 1992 Aug; 24(4):317-27.
- Szlyk, J. P.; Taglia, D.P.; Paliga, J; Edward, D. P., and Wilensky, J. T. Driving performance in patients with mild to moderate glaucomatous clinical vision changes. *J Rehab Res Dev*. 2002; 39(4):467-495.
- Szlyk, J. P.; Alexander, K. R.; Severing, K., and Fishman, G. A. Assessment of driving performance in patients with retinitis pigmentosa. *Arch Ophthalmol*. 1992 Dec; 110(12):1709-13.
- Szlyk, J. P.; Mahler, C. L.; Seiple, W.; Edward, D. P., and Wilensky, J. T. Driving performance of glaucoma patients correlates with peripheral visual field loss. *J Glaucoma*. 2005a; 14(2):145-50.
- Szlyk, J. P.; Pizzimenti, C. E.; Fishman, G. A.; Kelsch, R.; Wetzel, L. C.; Kagan, S., and Ho, K. A comparison of driving in older subjects with and without age-related macular degeneration. *Arch Ophthalmol*. 1995 Aug; 113(8):1033-40.
- Szlyk, J. P.; Seiple, W.; Laderman, D. J.; Kelsch, R.; Ho, K., and McMahon, T. Use of bioptic amorphic lenses to expand the visual field in patients with peripheral loss. *Optom Vis Sci*. 1998 Jul; 75(7):518-24.
- Szlyk, J. P.; Seiple, W.; Laderman, D. J.; Kelsch, R.; Stelmack, J., and McMahon, T. Measuring the effectiveness of bioptic telescopes for persons with central vision loss. *J Rehabil Res Dev*. 2000 Jan-2000 Feb 28; 37(1):101-8.
- Szlyk, J. P.; Seiple, W.; Stelmack, J., and McMahon, T. Use of prisms for navigation and driving in hemianopic patients. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2005b; 25(2):128-35.
- Tant, M.L.M., Brouwer, W.H., Cornelissen, F.W. and Kooiman, A.C. Prediction and evaluation of driving and visuo-spatial performance in homonymous hemianopia after compensational training. *Visual Impairment Research*. 2001, 3: 133-145.
- Tant, M. L. M. Visual Performance in Homonymous Hemianopia, Thesis. Groningen, The Netherlands: University of Groningen; 2002.
- Tant, M.L.M., Brouwer, W.H., Cornelissen, F.W. and Kooiman, A.C. Driving and visual spatial



## The Eyesight Working Group

- performance in people with hemianopia. *Neuropsychological Rehabilitation*. 2002, 12: 419-437.
- Theeuwes, J.; Alferdinck, J. W., and Perel, M. Relation between glare and driving performance. *Hum Factors*. 2002 Spring; 44(1):95-107.
- Van Rijn, L. J.; Nischler, C.; Gamer, D.; Franssen, L.; de Wit, G.; Kaper, R.; Vonhoff, D.; Grabner, G.; Wilhelm, H.; Völker-Dieben, H. J. and van den Berg, T. J. T. P. Measurement of straylight and glare: comparison of Nyktotest, Mesotest, Straylight meter and Computer implemented Straylight meter. *Br J Ophthalmol*. 2005a, 89: 345-351.
- Van Rijn, L. J. and Völker-Dieben, H. J. Assessment of vision impairment in relation to driving safety. A literature study . Amsterdam; 1999.
- van Rijn, L. J.; Wilhelm, H.; Emesz, M.; Kaper, R.; Heine, S.; Nitsch, S.; Grabner, G., and Völker-Dieben, H. J. Relation between perceived driving disability and scores of vision screening tests. *Br J Ophthalmol*. 2002 Nov; 86(11):1262-4.
- Van Rijn, L.J. Binocular visual field measurement for driving assessment: comparison of Esterman and Goldmann techniques. In: van den Berg, TJTP, van Rijn LJ Grabner G and Wilhelm H. Assessment of visual function of driving-licence holders. Joint research project supported by the European Commission I-TREN E3 200 7 SI2. 282826. 2003; pp. 61-80.
- Van Rijn, L. J. on behalf of the GLARE research group. Prevalence of impairments of visual function among European drivers. In: Van den Berg T. J. T. P.; Van Rijn, L. J.; Grabner, G.; Wilhelm, H. and Michael, R. and others. Relevance of glare sensitivity and impairment of visual function among European drivers. Joint research project supported by the European Commission SUB-B27020B-E3-GLARE-2002-S07. 18091. 2005b; pp. 6-44.
- VanNewkirk, M. R.; Weih, L.; McCarty, C. A., and Taylor, H. R. Cause-specific prevalence of bilateral visual impairment in Victoria, Australia: the Visual Impairment Project. *Ophthalmology*. 2001 May; 108(5):960-7.
- Vinding, T. Visual impairment of age-related macular degeneration. An epidemiological study of 1000 aged individuals. *Acta Ophthalmol (Copenh)*. 1990 Apr; 68(2):162-7.
- Von Hebenstreit, B. Sehvermögen und Verkehrsunfälle. *Klin Monatsbl Augenheilkd*. 1984; 185(2):86-90.
- Von Hebenstreit, B. Untersuchungen zur Sehschärfe unter nächtlichen Fahrbedingungen im Strassenverkehr (dämmerungssehschärfe). Bayern: Unternehmensgruppe TUV; Unternehmensgruppe TUV; 1995.
- Weinreb, R. N. and Perlman, J. P. The effect of refractive correction on automated perimetric thresholds. *Am J Ophthalmol*. 1986 Jun 15; 101(6):706-9.
- Wensor, M. D.; McCarty, C. A.; Stanislavsky, Y. L.; Livingston, P. M., and Taylor, H. R. The prevalence of glaucoma in the melbourne visual impairment project. *Ophthalmology* 1998 Apr;105(4):733-9. 1998.

## New Standards for the Visual Functions of Drivers

- West, C. G.; Gildengorin, G.; Haegerstrom-Portnoy, G.; Lott, L. A.; Schneck, M. E., and Brabyn, J. A. Vision and driving self-restriction in older adults. *J Am Geriatr Soc.* 2003 Oct; 51(10):1348-55.
- White, J. E.; Marshall, S. C.; Diedrich-Closson, K. L., and Burton, A. L. Evaluation of motor vehicle driving performance in patients with chronic diplopia. *J AAPOS.* 2001 Jun; 5(3):184-8.
- White, S. and O'Neill, D. Health and relicensing policies for older drivers in the European union. *Gerontology.* 2000 May-2000 Jun 30; 46(3):146-52.
- Williams, A. F and Carsten, O. Driver age and crash involvement. *Am J Public Health.* 1989 Mar; 79(3):326-7.
- Wood, J. M. Age and visual impairment decrease driving performance as measured on a closed-road circuit. *Hum Factors.* 2002 Fall; 44(3):482-94.
- Wood, J. M and Higgins, K. E. How well does high contrast acuity predict driving performance? A.G. Gale; I.D. Brown; C.M. Haslegrave, and S.P. Taylor, (eds.). *Vision in Vehicles VII.* London: Elsevier; 1999; pp. 33-42.
- Wood, J. M. and Mallon, K. Comparison of driving performance of young and old drivers (with and without visual impairment) measured during in-traffic conditions. *Optom Vis Sci.* 2001 May; 78(5):343-9.
- Wood, J. M. and Troutbeck, R. Elderly drivers and simulated visual impairment. *Optom Vis Sci.* 1995; 72(2):115-24.
- Wood, J. M. Owens D. A. Woolf M. I. & Owens J. predicting night time visibility while driving. *Journal of Vision.* 2002; 2(7):331a, <http://journalofvision.org/2/7/331/>
- Wormald, R. Screening in Ophthalmology. Johnson, jj; Minassian, DC; Weale, RA, and West, SK eds. *The epidemiology of eye disease.* London: Arnold publishers; 2003; pp. 88-101.
- Zaidel, D. M. and Hocherman, I. Licence renewal for older drivers: the effect of medical and vision tests. *J Safety Res.* 1986; 17:111-6.

## 10.7 Normativa Comunidad Económica Europea

26.8.2009

ES

Diario Oficial de la Unión Europea

L 223/31

### DIRECTIVA 2009/113/CE DE LA COMISIÓN

de 25 de agosto de 2009

que modifica la Directiva 2006/126/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre el permiso de conducción

LA COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS,

(6) Por tanto, la Directiva 2006/126/CE debe modificarse en consecuencia.

Visto el Tratado constitutivo de la Comunidad Europea,

(7) Las medidas previstas en la presente Directiva se ajustan al dictamen del Comité del permiso de conducción.

Vista la Directiva 2006/126/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre de 2006, sobre el permiso de conducción <sup>(1)</sup>, y, en particular, su artículo 8,

HA ADOPTADO LA PRESENTE DIRECTIVA:

#### Artículo 1

Considerando lo siguiente:

El anexo III de la Directiva 2006/126/CE queda modificado como se establece en el anexo.

#### Artículo 2

(1) No se han armonizado plenamente los requisitos mínimos de aptitud para la conducción. Los Estados miembros pueden imponer normas más rígidas que los requisitos europeos mínimos, como se dispone en el anexo III, punto 5, de la Directiva 2006/126/CE.

1. Los Estados miembros pondrán en vigor las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas necesarias para dar cumplimiento a lo establecido en la presente Directiva en el plazo máximo de un año a partir de la entrada en vigor de la presente Directiva. Informarán de ello inmediatamente a la Comisión.

(2) Como la existencia de distintos requisitos en los distintos Estados miembros puede afectar al principio de la libre circulación, el Consejo, en su Resolución de 26 de junio de 2000, pidió específicamente una revisión de las normas médicas para la concesión del permiso de conducción.

Cuando los Estados miembros adopten dichas disposiciones, estas harán referencia a la presente Directiva o irán acompañadas de dicha referencia en su publicación oficial. Los Estados miembros establecerán las modalidades de la mencionada referencia.

(3) De acuerdo con dicha Resolución del Consejo, la Comisión opinó que debían emprenderse trabajos a medio y largo plazo para adaptar el anexo III al progreso científico y técnico como establece el artículo 8 de la Directiva 2006/126/CE.

2. Los Estados miembros comunicarán a la Comisión el texto de las disposiciones básicas de Derecho interno que adopten en el ámbito regulado por la presente Directiva.

#### Artículo 3

(4) Se señalaron la vista, la diabetes y la epilepsia como aspectos médicos relativos a la aptitud para la conducción que merecían consideración: con este fin se crearon grupos de trabajo formados por especialistas designados por los Estados miembros.

Los destinatarios de la presente Directiva serán los Estados miembros.

Hecho en Bruselas, el 25 de agosto de 2009.

(5) Estos grupos de trabajo presentaron informes con vistas a actualizar los puntos correspondientes del anexo III de la Directiva 2006/126/CE.

Por la Comisión  
Antonio TAJANI  
Vicepresidente

<sup>(1)</sup> DO L 403 de 30.12.2006, p. 18.

## ANEXO

El anexo III de la Directiva 2006/126/CE queda modificado como sigue:

1) El punto 6 se sustituye por el texto siguiente:

## «CAPACIDAD VISUAL

6. Los candidatos a un permiso de conducción deberán someterse a las investigaciones apropiadas que garanticen que poseen una agudeza visual adecuada para la conducción de vehículos de motor. Cuando haya algún motivo para dudar de que el candidato posee una capacidad visual adecuada, deberá ser examinado por una autoridad médica competente. En este examen se deberá prestar especial a lo siguiente: agudeza visual, campo visual, visión crepuscular, deslumbramiento y sensibilidad al contraste, diplopía y otras funciones visuales que pueden afectar a la seguridad de la conducción.

Podrá considerarse la concesión de permisos de conducción a conductores del grupo 1 en “casos excepcionales” en los que no se cumpla la norma relativa al campo visual o la relativa a la agudeza visual; en tales casos, el conductor deberá ser examinado por una autoridad médica competente para demostrar que no hay ninguna otra alteración de la función visual, con inclusión del deslumbramiento, la sensibilidad al contraste y la visión crepuscular. El conductor o candidato deberá someterse además a una prueba práctica satisfactoria efectuada por una autoridad competente.

*Grupo 1*

- 6.1. Los candidatos a la expedición o renovación de un permiso de conducción deberán poseer una agudeza visual binocular, si es preciso mediante lentes correctoras, de al menos 0,5 con ambos ojos a la vez.

Además, el campo visual horizontal deberá ser como mínimo de 120 grados, la extensión deberá ser como mínimo de 50 grados a la izquierda y a la derecha y de 20 grados arriba y abajo. No deberá haber ningún defecto dentro del radio de los 20 grados centrales.

Si se descubre o declara una enfermedad ocular progresiva, se podrá expedir o renovar el permiso de conducción supeditado a un reconocimiento periódico del candidato, efectuado por una autoridad médica competente.

- 6.2. Los candidatos a la expedición o renovación de un permiso de conducción que padezcan una pérdida funcional total de la visión de un ojo o que utilicen solamente un ojo, por ejemplo en casos de diplopía, deberán poseer una agudeza visual de al menos 0,5, si es preciso mediante lentes correctoras. La autoridad médica competente deberá certificar que esta situación de visión monocular lleva presente el tiempo suficiente para que el interesado se haya adaptado y que el campo visual del ojo en cuestión cumple el requisito establecido en el punto 6.1.

- 6.3. Tras una diplopía recientemente aparecida o tras la pérdida de visión de un ojo, deberá transcurrir un período de adaptación adecuado (por ejemplo, de seis meses) durante el que no estará permitida la conducción. Una vez transcurrido este período, la conducción se permitirá solo previo dictamen favorable de expertos de la visión y de la conducción.

*Grupo 2*

- 6.4. Los candidatos a la expedición o renovación de un permiso de conducción deberán poseer una agudeza visual, si es preciso mediante lentes correctoras, de al menos 0,8 en el ojo que esté en mejores condiciones y de al menos 0,1 en el ojo que esté en peores condiciones. Si se utilizan lentes correctoras para alcanzar los valores de 0,8 y 0,1, la agudeza mínima (0,8 y 0,1) se deberá obtener mediante gafas cuya potencia no podrá exceder de + 8 dioptrías o bien mediante lentes de contacto. Se deberá tolerar bien la corrección.

Además, el campo visual horizontal con ambos ojos deberá ser como mínimo de 160 grados y la extensión deberá ser como mínimo de 70 grados a la izquierda y a la derecha y de 30 grados arriba y abajo. No deberá haber ningún defecto dentro del radio de los 30 grados centrales.

No deberá expedirse ni renovarse el permiso de conducción a ningún candidato o conductor que padezca de trastornos de la sensibilidad al contraste o de diplopía.

Tras una pérdida importante de visión de un ojo, deberá transcurrir un período de adaptación adecuado (por ejemplo, de seis meses) durante el que no estará permitida la conducción. Una vez transcurrido este período, la conducción se permitirá solo previo dictamen favorable de expertos de la visión y de la conducción.»

2) El punto 10 se sustituye por el texto siguiente:

«DIABETES SACARINA

10. En los puntos siguientes se entenderá por hipoglucemia grave la que exija la ayuda de otra persona, y por hipoglucemia recurrente la repetición de una hipoglucemia grave dentro de un plazo de 12 meses.

*Grupo 1*

- 10.1. Será posible expedir o renovar el permiso de conducción a candidatos o conductores que padezcan diabetes sacarina. Cuando reciban tratamiento con medicamentos, los interesados deberán presentar un dictamen médico autorizado y someterse a revisiones médicas periódicas, de forma adecuada a cada caso, pero el intervalo no deberá ser de más de cinco años.
- 10.2. No deberá expedirse ni renovarse el permiso de conducción a ningún candidato o conductor que padezca hipoglucemia grave recurrente o alteraciones de la conciencia de la hipoglucemia. Los conductores que padezcan diabetes deberán demostrar que conocen el riesgo de hipoglucemia y cómo controlar adecuadamente este trastorno.

*Grupo 2*

- 10.3. Podrá considerarse la expedición o renovación de permisos del grupo 2 a conductores con diabetes sacarina. Cuando se aplique un tratamiento con medicamentos que impliquen riesgo de inducción de hipoglucemia (es decir, insulina y ciertos comprimidos), deberán cumplirse las condiciones siguientes:

- no se ha producido ningún episodio de hipoglucemia grave en los últimos 12 meses,
- el conductor tiene plena conciencia de la hipoglucemia,
- el conductor ha demostrado que controla adecuadamente su trastorno mediante la supervisión periódica de la glucemia, al menos dos veces al día y en momentos pertinentes para la conducción,
- el conductor ha demostrado que conoce los riesgos de la hipoglucemia,
- no hay otras complicaciones inhabilitantes de la diabetes.

Además, en estos casos, tales permisos deberán expedirse supeditados al dictamen de una autoridad médica competente y revisiones médicas periódicas, efectuadas a intervalos de no más de tres años.

- 10.4. Los episodios de hipoglucemia grave durante las horas de vigilia, incluso aunque no estén relacionados con la conducción, deberán comunicarse y ser causa para reevaluar la situación del permiso de conducción.»

3) El punto 12 se sustituye por el texto siguiente:

«EPILEPSIA

12. Las crisis epilépticas y demás perturbaciones súbitas del estado de conciencia constituyen un grave peligro para la seguridad vial si le sobrevienen a una persona durante la conducción de un vehículo de motor.

Se define la epilepsia como la presentación de dos o más crisis epilépticas en un plazo de menos de cinco años. Por crisis epiléptica provocada se entiende la que tiene un factor causante identificable y evitable.

A las personas que hayan tenido una crisis o pérdida de conciencia inicial o aislada se les debe aconsejar que no conduzcan. Es necesario que un especialista elabore un informe donde se indique el plazo de prohibición de la conducción y el seguimiento exigible.

Es extremadamente importante que se identifique el tipo específico de síndrome y crisis epilépticas de cada persona, de forma que pueda efectuarse una evaluación adecuada de la seguridad de su conducción (incluido el riesgo de crisis futuras) y establecerse la terapia pertinente. El encargado debería ser un neurólogo.

#### Grupo 1

- 12.1. El permiso de conducción de los conductores evaluados dentro del grupo 1 con epilepsia deberá ser objeto de reconsideración hasta que haya pasado un mínimo de cinco años sin que se presente ninguna crisis.

Si la persona tiene epilepsia, no cumple los criterios para conseguir un permiso de conducción sin condiciones y es necesario notificarlo a la autoridad que expide los permisos.

- 12.2. Crisis epiléptica provocada: El candidato que haya tenido una crisis epiléptica provocada debido a un factor causante identificable, que tenga pocas probabilidades de volver a darse al volante, podrá ser declarado capaz de conducir en cada caso, sujeto a dictamen neurológico (la evaluación deberá, en su caso, ajustarse a lo dispuesto en las demás secciones pertinentes del anexo III (por ejemplo, en caso de ingesta de alcohol u otra morbilidad asociada)).
- 12.3. Crisis primera o única no provocada: El candidato que haya tenido una primera crisis epiléptica no provocada podrá ser declarado capaz de conducir tras un plazo de seis meses sin crisis, a condición de que haya habido una evaluación médica adecuada. Las autoridades nacionales podrán autorizar a conducir antes a los conductores que tengan buenos indicadores de pronóstico.
- 12.4. Otras pérdidas de conciencia: La pérdida de conciencia deberá evaluarse en función del riesgo de que se vuelva a dar durante la conducción.
- 12.5. Epilepsia: Los conductores o candidatos podrán ser declarados aptos para conducir tras un período de un año sin haber padecido nuevas crisis.
- 12.6. Crisis exclusivamente durante el sueño: El candidato o conductor que nunca haya tenido crisis distintas de las producidas durante el sueño podrá ser declarado apto para conducir siempre que esta pauta se haya confirmado durante un plazo que no será inferior al tiempo que se debe estar exento de crisis en caso de epilepsia. Si se produce algún ataque o crisis en fase de vigilia, será necesario que pase un año completo sin nuevos episodios antes de que se pueda conceder el permiso de conducción (véase "Epilepsia").
- 12.7. Crisis sin influencia sobre la conciencia o la capacidad de actuar: El candidato o conductor que nunca haya tenido crisis distintas de aquellas respecto a las que se haya demostrado de forma exclusiva que no afectan a la conciencia ni causan ningún impedimento funcional puede ser declarado apto para conducir siempre que esta pauta se haya confirmado durante un plazo que no será inferior al tiempo que debe estar exento de crisis en caso de epilepsia. Si se produce algún ataque o crisis de algún otro tipo, será necesario que pase un año completo sin nuevos episodios antes de que se pueda conceder el permiso de conducción (véase "Epilepsia").
- 12.8. Crisis debidas a un cambio o reducción de una terapia antiepiléptica bajo la dirección de un médico: Se le podrá aconsejar al paciente que no conduzca desde el inicio del período de retirada y, posteriormente, durante el plazo de seis meses tras el cese del tratamiento. Las crisis producidas durante un cambio o retirada de medicación, aconsejado por un médico, impondrán un período de tres meses sin conducir si se restablece el tratamiento anteriormente eficaz.
- 12.9. Tras cirugía curativa de la epilepsia: Véase "Epilepsia".

#### Grupo 2

- 12.10. El candidato deberá estar sin medicación antiepiléptica durante el plazo requerido de ausencia de crisis. Se habrá efectuado una supervisión médica adecuada. La amplia investigación neurológica efectuada no habrá detectado ninguna patología cerebral relevante y no se observará actividad epileptiforme en el electroencefalograma (EEG). Tras un episodio agudo, deberá efectuarse un EEG y una evaluación neurológica adecuada.

- 12.11. Crisis epiléptica provocada: El candidato que haya tenido una crisis epiléptica provocada debido a un factor causante identificable, que tenga pocas probabilidades de volver a darse al volante, podrá ser declarado capaz de conducir en cada caso, sujeto a dictamen neurológico. Tras el episodio agudo, deberá efectuarse un EEG y una evaluación neurológica adecuada.

Las personas con lesiones intracerebrales estructurales con un riesgo aumentado de crisis no podrán conducir vehículos del grupo 2 hasta que el riesgo de epilepsia se haya reducido hasta al menos el 2 % anual. La evaluación, en su caso, deberá ajustarse a las demás secciones pertinentes del anexo III (por ejemplo, en caso de ingesta de alcohol).

- 12.12. Crisis primera o única no provocada: El candidato que haya tenido una primera crisis epiléptica no provocada podrá ser declarado capaz de conducir cuando haya superado un plazo de cinco años sin nuevas crisis sin ayuda de medicamentos antiepilépticos, a condición de que haya habido una evaluación neurológica adecuada. Las autoridades nacionales podrán autorizar a conducir antes a los conductores que tengan buenos indicadores de pronóstico.

- 12.13. Otras pérdidas de conciencia: La pérdida de conciencia deberá evaluarse en función del riesgo de que se vuelva a dar durante la conducción. Este riesgo deberá ser como máximo del 2 % anual.

- 12.14. Epilepsia: Deberá superarse un plazo de diez años sin nuevas crisis y sin ayuda de medicamentos antiepilépticos. Las autoridades nacionales podrán autorizar a conducir antes a los conductores que tengan buenos indicadores de pronóstico. Esto será aplicable también en caso de "epilepsia juvenil".

Ciertas alteraciones (por ejemplo, anomalías arteriovenosas o hemorragia intracerebral) implican un aumento del riesgo de crisis, incluso aunque aún no se hayan producido estas. En una situación así, es necesario que una autoridad médica competente efectúe una evaluación; el riesgo de sufrir una crisis debe ser como máximo del 2 % anual para poder tener permiso de conducción.».

## 10.8 Normativa española



## I. DISPOSICIONES GENERALES

## MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA

**13946** Orden PRE/2356/2010, de 3 de septiembre, por la que se modifica el Anexo IV del Reglamento General de Conductores, aprobado por el Real Decreto 818/2009, de 8 de mayo.

Mediante el Reglamento General de Conductores, aprobado por el Real Decreto 818/2009, de 8 de mayo, se ha incorporado a nuestro ordenamiento la Directiva 2006/126/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre, sobre el permiso de conducción, derogándose expresamente el anterior Reglamento General de Conductores por el que se había traspuesto a nuestro derecho interno la Directiva 91/439/CEE, del Consejo, de 29 de julio, sobre el citado permiso.

En este contexto, la Comisión ha considerado necesario adaptar al progreso científico y técnico algunas de las aptitudes exigidas para la conducción de vehículos, en concreto las referidas a la vista, la diabetes y la epilepsia.

Para ello, y al objeto de que todos los Estados miembros, tanto los que ya han incorporado a su ordenamiento interno la Directiva 2006/126/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre, como aquellos otros que todavía no lo han hecho y continúan rigiéndose por la Directiva 91/439/CEE, del Consejo, de 29 de julio, adapten sus respectivos ordenamientos a los cambios propuestos, la Comisión ha tenido que dictar dos Directivas con el mismo contenido.

Una primera Directiva, la Directiva 2009/112/CE, de la Comisión, de 25 de agosto, que modifica el Anexo III de la Directiva 91/439/CEE, del Consejo, de 29 de julio, que estarán obligado a incorporar a su ordenamiento interno aquellos Estados miembros que sigan rigiéndose por la misma.

Y, una segunda Directiva, la Directiva 2009/113/CE, de la Comisión, de 25 de agosto, que modifica el Anexo III de la Directiva 2006/126/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre, para aquellos Estados miembros que hayan incorporado a su ordenamiento la citada Directiva, como en el caso de España que la ha incorporado a nuestro derecho interno mediante el vigente Reglamento General de Conductores.

A tenor de lo expuesto, al objeto de incorporar a nuestro ordenamiento la Directiva 2009/113/CE, de la Comisión, de 25 de agosto, se dicta la presente orden por la que se modifica el Anexo IV del Reglamento General de Conductores.

Conforme a la habilitación contenida en la disposición final segunda del mencionado Real Decreto 818/2009, de 8 de mayo, la modificación del Anexo IV exige que se haga por Orden de la Ministra de la Presidencia, a propuesta conjunta de los Ministros del Interior y de Sanidad y Política Social.

Esta orden ha sido informada por el Consejo Superior de Seguridad Vial, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 5.2 e) del Real Decreto 317/2000, de 14 de marzo, por el que se regula su organización y funcionamiento.





En su virtud, a propuesta de los Ministros del Interior y de Sanidad y Política Social, y de acuerdo con el Consejo de Estado, dispongo:

**Artículo único.** *Modificación del Anexo IV del Reglamento General de Conductores, aprobado por el Real Decreto 818/2009, de 8 de mayo.*

El apartado 1 «Capacidad visual», los puntos 1 y 2 del apartado 8 «Enfermedades metabólicas y endocrinas», el epígrafe y el punto 2 del apartado 9 «Sistema nervioso y muscular» del Anexo IV «Aptitudes psicofísicas requeridas para obtener o prorrogar la vigencia del permiso o de la licencia de conducción» del Reglamento General de Conductores, aprobado por el Real Decreto 818/2009, de 8 de mayo, quedan redactados del siguiente modo:

«1. *Capacidad Visual*

Si para alcanzar la agudeza visual requerida es necesaria la utilización de lentes correctoras, deberá expresarse, en el informe de aptitud psicofísica, la obligación de su uso durante la conducción. Dichas lentes deberán ser bien toleradas. A efectos de este anexo, las lentes intraoculares no deberán considerarse como lentes correctoras, y se entenderá como visión monocular toda agudeza visual inferior a 0,10 en un ojo, con o sin lentes correctoras, debida a pérdida anatómica o funcional de cualquier etiología.

Exploración (1)	Criterios de aptitud para obtener o prorrogar permiso o licencia de conducción ordinarios		Adaptaciones, restricciones y otras limitaciones en personas, vehículos o de circulación en permiso o licencia sujetos a condiciones restrictivas	
	Grupo 1: AM, A1, A2, A, B, B + E y LCC (art. 45.1a) (2)	Grupo 2: BTP, C1, C1 + E, C, C + E, D1, D1 + E, D, D + E (art. 45.1b y 2) (3)	Grupo 1 (4)	Grupo 2 (5)
1.1 Agudeza visual.	Se debe poseer, si es preciso con lentes correctoras, una agudeza visual binocular de, al menos, 0,5.	Se debe poseer, con o sin corrección óptica, una agudeza visual de, al menos, 0,8 y, al menos, 0,1 para el ojo con mejor agudeza y con peor agudeza respectivamente. Si se precisa corrección con gafas, la potencia de éstas no podrá exceder de + 8 dioptrías.	No se admiten.	No se admiten.
	No se admite la visión monocular.	No se admite la visión monocular.	Los afectados de visión monocular con agudeza visual en el ojo mejor de 0,5 o mayor, y más de seis meses de antigüedad en visión monocular, podrán obtener o prorrogar permiso o licencia, siempre que reúna las demás capacidades visuales. Cuando, por el grado de agudeza visual o por la existencia de una enfermedad ocular progresiva, los reconocimientos periódicos a realizar fueran por período inferior al de vigencia normal del permiso o licencia, el período de vigencia se fijará según criterio médico. Espejo retrovisor exterior a ambos lados del vehículo y espejo interior panorámico o, en su caso, espejo retrovisor adaptado.	No se admiten.

Exploración (1)	Criterios de aptitud para obtener o prorrogar permiso o licencia de conducción ordinarios		Adaptaciones, restricciones y otras limitaciones en personas, vehículos o de circulación en permiso o licencia sujetos a condiciones restrictivas	
	Grupo 1: AM, A1, A2, A, B, B + E y LCC (art. 45.1a) (2)	Grupo 2: BTP, C1, C1 + E, C, C + E, D1, D1 + E, D, D + E (art. 45.1b y 2) (3)	Grupo 1 (4)	Grupo 2 (5)
	No se admite la cirugía refractiva (distinta de afaquia)	No se admite la cirugía refractiva (distinta de afaquia)	Tras un mes de efectuada cirugía refractiva, aportando informe de la intervención, se podrá obtener o prorrogar el permiso o licencia, con período de vigencia máximo de un año. Transcurrido un año desde la fecha de la intervención, y teniendo en cuenta el defecto de refracción prequirúrgico, la refracción actual y la posible existencia de efectos secundarios no deseados, a criterio oftalmológico se fijará el período de vigencia posterior.	En caso de cirugía refractiva, y transcurridos tres meses desde la intervención, aportando informe de la intervención, se podrá obtener o prorrogar el permiso con período de vigencia máximo de un año. Transcurrido un año desde la fecha de la intervención, y teniendo en cuenta el defecto de refracción prequirúrgico, la refracción actual y la posible existencia de efectos secundarios no deseados, a criterio oftalmológico se fijará el período de vigencia posterior.
1.2 Campo visual.	Si la visión es binocular, el campo binocular ha de ser normal. En el examen binocular, el campo visual central no ha de presentar escotomas absolutos en puntos correspondientes de ambos ojos ni escotomas relativos significativos en la sensibilidad retiniana.  Si la visión es monocular, el campo visual monocular debe ser normal. El campo visual central no ha de presentar escotomas absolutos ni escotomas relativos significativos en la sensibilidad retiniana.	Se debe poseer un campo visual binocular normal. Tras la exploración de cada uno de los campos monoculares, estos no han de presentar reducciones significativas en ninguno de sus meridianos. En el examen monocular, no se admite la presencia de escotomas absolutos ni escotomas relativos significativos en la sensibilidad retiniana.  No se admite visión monocular.	No se admiten.  No se admiten.	No se admiten.  No se admiten.
1.3 Afaquias y pseudofaquias.	No se admiten las monolaterales ni las bilaterales.	Ídem grupo 1.	Trascurrido un mes de establecidas, si se alcanzan los valores determinados en los apartados 1.1 y 1.2 correspondientes al grupo 1, el período de vigencia del permiso o licencia será, como máximo, de tres años, según criterio médico.	Trascurridos dos meses de establecidas, si se alcanzan los valores determinados en los apartados 1.1 y 1.2 correspondientes al grupo 2, el período de vigencia del permiso será, como máximo, de tres años, según criterio médico.
1.4 Sensibilidad al contraste.	No deben existir alteraciones significativas en la capacidad de recuperación al deslumbramiento ni alteraciones de la visión mesópica.	Ídem grupo 1.	En el caso de padecer alteraciones de la visión mesópica o del deslumbramiento, se deberán establecer las restricciones y limitaciones que, a criterio oftalmológico sean precisas para garantizar la seguridad en la conducción. En todo caso se deben descartar patologías oftalmológicas que originen alteraciones incluidas en alguno de los restantes apartados sobre capacidad visual.	No se admiten.
1.5 Motilidad palpebral.	No se admiten ptosis ni lagofthalmias que afecten a la visión en los límites y condiciones señaladas en los apartados 1.1 y 1.2 correspondientes al grupo 1.	No se admiten ptosis ni lagofthalmias que afecten a la visión en los límites y condiciones señaladas en los apartados 1.1 y 1.2 correspondientes al grupo 2.	No se admiten.	No se admiten.



Exploración (1)	Criterios de aptitud para obtener o prorrogar permiso o licencia de conducción ordinarios		Adaptaciones, restricciones y otras limitaciones en personas, vehículos o de circulación en permiso o licencia sujetos a condiciones restrictivas	
	Grupo 1: AM, A1, A2, A, B, B + E y LCC (art. 45.1a) (2)	Grupo 2: BTP, C1, C1 + E, C, C + E, D1, D1 + E, D, D + E (art. 45.1b y 2) (3)	Grupo 1 (4)	Grupo 2 (5)
1.6 Motilidad del globo ocular.	Las diplopías impiden la obtención o prorroga.	Ídem grupo 1.	Las diplopías sólo se permitirán a criterio oftalmológico siempre que no se manifiesten en los 20º centrales del campo visual y no produzcan ninguna otra sintomatología, en especial fatiga visual. En las de reciente aparición debe transcurrir un período de, al menos, 6 meses sin conducir. En caso de permitirse la obtención o prorroga del permiso o licencia, el período de vigencia máximo será de tres años. Cuando la diplopía se elimine mediante la oclusión de un ojo se aplicaran las restricciones propias de la visión monocular.	No se admiten.
	El nistagmus impide la obtención o prorroga cuando no permita alcanzar los niveles de capacidad visual indicados en los apartados 1.1 a 1.7 del grupo 1, ambos inclusive, cuando sea manifestación de alguna enfermedad de las incluidas en el presente anexo o cuando, a criterio facultativo, origine o pueda originar fatiga visual durante la conducción.	El nistagmus impide la obtención o prorroga cuando no permita alcanzar los niveles de capacidad visual indicados en los apartados 1.1 a 1.7 del grupo 2, ambos inclusive, cuando sea manifestación de alguna enfermedad de las incluidas en el presente anexo o cuando, a criterio facultativo, origine o pueda originar fatiga visual durante la conducción.	No se admiten.	No se admiten.
	No se admiten otros defectos de la visión binocular ni estrabismos que impidan alcanzar los niveles fijados en los apartados 1.1 a 1.7 del grupo 1, ambos inclusive. Cuando no impidan alcanzar los niveles de capacidad visual indicados en los apartados 1.1 a 1.7 del grupo 1, ambos inclusive, el oftalmólogo deberá valorar, principalmente, sus consecuencias sobre la fatiga visual, los defectos refractivos, el campo visual, el grado de estereopsis, la presencia de forias y de tortícolis y la aparición de diplopía, así como la probable evolución del proceso, fijando en consecuencia el período de vigencia.	No se admiten otros defectos de la visión binocular ni los estrabismos.	Quando los estrabismos u otros defectos de la visión binocular no impidan alcanzar los niveles de capacidad visual indicados en los apartados 1.1 a 1.7 del grupo 1, ambos inclusive, y, debido a su repercusión sobre parámetros como la fatiga visual, los defectos refractivos, el campo visual, el grado de estereopsis, la presencia de forias y de tortícolis, la aparición de diplopía o por la probable evolución del proceso, los reconocimientos periódicos a realizar fueran por período inferior al de vigencia normal del permiso o licencia, éste se fijará según el criterio del oftalmólogo.	Quando los estrabismos u otros defectos de la visión binocular no impidan alcanzar los niveles de capacidad visual indicados en los apartados 1.1 a 1.7 del grupo 2, ambos inclusive, el oftalmólogo deberá valorar sus consecuencias sobre parámetros como la fatiga visual, los defectos refractivos, el campo visual, el grado de estereopsis, la presencia de forias y de tortícolis, la aparición de diplopía y la probable evolución del proceso, fijando en consecuencia el período de vigencia, que será en todo caso como máximo de tres años.
1.7 Deterioro progresivo de la capacidad visual.	Las enfermedades progresivas que no permitan alcanzar los niveles fijados en los apartados 1.1 a 1.6 anteriores, ambos inclusive, impiden la obtención o prorroga.	Las enfermedades y los trastornos progresivos de la capacidad visual impiden la obtención o prorroga.	Quando no impidan alcanzar los niveles fijados en los apartados 1.1 al 1.6, y los reconocimientos periódicos a realizar fueran por período inferior al de vigencia normal del permiso o licencia, el período de vigencia se fijará según criterio médico.	No se admiten.



Exploración (1)	Criterios de aptitud para obtener o prorrogar permiso o licencia de conducción ordinarios		Adaptaciones, restricciones y otras limitaciones en personas, vehículos o de circulación en permiso o licencia sujetos a condiciones restrictivas	
	Grupo 1: AM, A1, A2, A, B, B + E y LCC (art. 45.1a) (2)	Grupo 2: BTP, C1, C1 + E, C, C + E, D1, D1 + E, D, D + E (art. 45.1b y 2) (3)	Grupo 1 (4)	Grupo 2 (5)
1.8 Deterioro agudo de la capacidad visual.	Cuando aún alcanzando los niveles fijados en los apartados 1.1 al 1.6 anteriores, ambos inclusive, la presión intraocular se encuentre por encima de los límites normales, se deberán analizar posibles factores de riesgo asociados y se establecerá un control periódico a criterio oftalmológico.	Idem grupo 1.	Cuando los reconocimientos periódicos a realizar fueran por período inferior al de vigencia normal del permiso o licencia, el período de vigencia se fijará según criterio médico.	Cuando los reconocimientos periódicos a realizar fueran por período inferior al de vigencia normal del permiso, el período de vigencia se fijará según criterio médico.
	Tras una pérdida importante y brusca de visión en un ojo, deberá transcurrir un período de adaptación de 6 meses sin conducir, tras el cual se podrá obtener o renovar el permiso o licencia aportando informe oftalmológico favorable.	Idem grupo 1.	No se admiten.	No se admiten.

## 8. Enfermedades Metabólicas y Endocrinas

Exploración (1)	Criterios de aptitud para obtener o prorrogar permiso o licencia de conducción ordinarios		Adaptaciones, restricciones y otras limitaciones en personas, vehículos o de circulación en permiso o licencia sujetos a condiciones restrictivas	
	Grupo 1: AM, A1, A2, A, B, B + E y LCC (art. 45.1a) (2)	Grupo 2: BTP, C1, C1 + E, C, C + E, D1, D1 + E, D, D + E (art. 45.1b y 2) (3)	Grupo 1 (4)	Grupo 2 (5)
8.1 "Diabetes mellitus".	No debe existir diabetes mellitus que curse con inestabilidad metabólica severa que requiera asistencia hospitalaria, ni diabetes mellitus en tratamiento con insulina o con fármacos hipoglucemiantes.	No debe existir diabetes mellitus que curse con inestabilidad metabólica severa que requiera asistencia hospitalaria, ni diabetes mellitus tratada con insulina o con fármacos hipoglucemiantes.	Siempre que sea preciso el tratamiento con insulina o con fármacos hipoglucemiantes se deberá aportar informe médico favorable que acredite el adecuado control de la enfermedad y la adecuada formación diabetológica del interesado. El período de vigencia máximo será de cinco años, y podrá ser reducido a criterio facultativo.	Los afectados de diabetes mellitus tipo 1 y los de tipo 2 que requieran tratamiento con insulina, aportando informe favorable de un endocrinólogo o diabetólogo que acredite el adecuado control de la enfermedad y la adecuada formación diabetológica del interesado, en casos muy excepcionales podrán obtener o prorrogar el permiso con un período de vigencia máximo de 1 año. Los afectados de diabetes tipo 2 que precisen tratamiento con fármacos hipoglucemiantes, deberán aportar informe favorable de un endocrinólogo o diabetólogo que acredite el buen control y el conocimiento de la enfermedad y el período máximo de vigencia será de tres años.
8.2 Cuadros de hipoglucemia.	No deben existir, en el último año, cuadros repetidos de hipoglucemia aguda ni alteraciones metabólicas que cursen con pérdida de conciencia.	Idem grupo 1.	No se admiten.	No se admiten.





## 9. Sistema Nervioso y Muscular

No deben existir enfermedades del sistema nervioso y muscular que produzcan pérdida o disminución grave de las funciones motoras, sensoriales o de coordinación que incidan involuntariamente en el control del vehículo.

Se define la epilepsia como la presentación de dos o más crisis epilépticas en un plazo menor de 5 años. Por crisis epiléptica provocada la que tiene un factor causante identificable y evitable.

Exploración (1)	Criterios de aptitud para obtener o prorrogar permiso o licencia de conducción ordinarios		Adaptaciones, restricciones y otras limitaciones en personas, vehículos o de circulación en permiso o licencia sujetos a condiciones restrictivas	
	Grupo 1: AM, A1, A2, A, B, B + E y LCC (art. 45.1a) (2)	Grupo 2: BTP, C1, C1 + E, C, C + E, D1, D1 + E, D, D + E (art. 45.1b y 2) (3)	Grupo 1 (4)	Grupo 2 (5)
9.2 Epilepsias y crisis convulsivas de otras etiologías.	<p>No se permiten cuando hayan aparecido crisis epilépticas convulsivas o crisis con pérdida de conciencia durante el último año.</p> <p>En el caso de crisis convulsivas o con pérdida de conciencia durante el sueño, se deberá constatar que, al menos, ha transcurrido un año sólo con estas crisis y sólo durante el sueño.</p> <p>En el caso de crisis epilépticas repetidas sin influencia sobre la conciencia o sobre la capacidad de actuar, se deberá constatar que, al menos, ha transcurrido un año sólo con este tipo de crisis.</p>	<p>Sólo se permiten cuando no han precisado tratamiento ni se han producido crisis durante los diez últimos años.</p> <p>Sólo se permiten cuando no han precisado tratamiento ni se han producido crisis durante los diez últimos años.</p> <p>En el caso de crisis epilépticas repetidas sin influencia sobre la conciencia o sobre la capacidad de actuar, se deberá constatar que, al menos, ha transcurrido un año sólo con este tipo de crisis y sin tratamiento.</p>	<p>Los afectados de epilepsias con crisis convulsivas o con crisis con pérdida de conciencia, deberán aportar informe favorable de un neurólogo en el que se haga constar el diagnóstico, el cumplimiento del tratamiento, la frecuencia de crisis y que el tratamiento farmacológico prescrito no impide la conducción. El período de vigencia del permiso o licencia será de dos años como máximo. En el caso de ausencia de crisis durante los tres últimos años, el período de vigencia será de cinco años como máximo.</p> <p>En el caso de estas crisis durante el sueño, el período de vigencia del permiso o licencia será como máximo de dos años, con informe favorable de un neurólogo en el que se haga constar el diagnóstico, el cumplimiento del tratamiento, la ausencia de otras crisis convulsivas y que el tratamiento farmacológico prescrito, en su caso, no impide la conducción. En el caso de ausencia de este tipo de crisis durante los tres últimos años, el período de vigencia será de cinco años como máximo.</p> <p>Deberá aportarse informe favorable de un neurólogo en que se haga constar el diagnóstico, cumplimiento del tratamiento, en su caso, la frecuencia de las crisis y que el tratamiento farmacológico prescrito no impide la conducción. El período de vigencia del permiso será de dos años como máximo.</p>	<p>Los afectados de epilepsias deberán aportar informe favorable de un neurólogo en el que se acredite que no han precisado tratamiento ni han padecido crisis durante los diez últimos años, no existe ninguna patología cerebral relevante ni actividad epileptiforme en el EEG. El período de vigencia del permiso será de dos años como máximo.</p> <p>Los afectados de epilepsias deberán aportar informe favorable de un neurólogo en el que se acredite que no han precisado tratamiento ni han padecido crisis durante los diez últimos años, no existe ninguna patología cerebral relevante ni actividad epileptiforme en el EEG. El período de vigencia del permiso será de dos años como máximo.</p> <p>Deberá aportarse informe favorable de un neurólogo en que haga constar el diagnóstico, la no existencia de otro tipo de crisis y que no ha precisado tratamiento durante el último año. El período de vigencia del permiso será de un año como máximo.</p>

Exploración (1)	Criterios de aptitud para obtener o prorrogar permiso o licencia de conducción ordinarios		Adaptaciones, restricciones y otras limitaciones en personas, vehículos o de circulación en permiso o licencia sujetos a condiciones restrictivas	
	Grupo 1: AM, A1, A2, A, B, B + E y LCC (art. 45.1a) (2)	Grupo 2: BTP, C1, C1 + E, C, C + E, D1, D1 + E, D, D + E (art. 45.1b y 2) (3)	Grupo 1 (4)	Grupo 2 (5)
	En el caso de crisis epiléptica provocada debido a un factor causante identificable se deberá aportar un informe neurológico favorable en el que conste además un período libre de crisis de, al menos, seis meses. Se tendrán en cuenta otros apartados de este Anexo.	En el caso de crisis epiléptica provocada, debida a un factor causante identificable, se deberá aportar un informe neurológico favorable que acredite un período libre de crisis de, al menos, un año e incluya valoración electroencefalográfica. Se tendrán en cuenta otros apartados de este Anexo. En caso de lesiones estructurales cerebrales con riesgo aumentado, para el inicio de crisis epilépticas, deberá valorarse su magnitud mediante informe neurológico.	No se admiten.	No se admiten.
	En el caso de primera crisis o única no provocada, se deberá acreditar un período libre de crisis de, al menos, seis meses mediante informe neurológico.	En el caso de primera crisis o única no provocada, se deberá acreditar un período libre de crisis de, al menos, cinco años y sin fármacos antiepilépticos mediante informe neurológico. A criterio neurológico y si se reúnen buenos indicadores de pronóstico se podrá reducir el período libre de crisis exigido.	No se admiten.	No se admiten.
	En el caso de otras pérdidas de conciencia se deberán evaluar en función del riesgo de recurrencia y de la exposición al riesgo.	En el caso de otras pérdidas de conciencia se deberán evaluar en función del riesgo de recurrencia y de la exposición al riesgo.	No se admiten.	No se admiten.
	Si se produce una crisis convulsiva o con pérdida de conciencia durante un cambio o retirada de medicación se deberá acreditar 1 año libre de crisis una vez restablecido el tratamiento antiepiléptico. A criterio neurológico se podrá impedir la conducción desde el inicio de la retirada del tratamiento y durante el plazo de 6 meses tras el cese del mismo.	No se admite la mediación antiepiléptica.	No se admiten.	No se admiten.»

**Disposición derogatoria única.** *Derogación normativa.*

Quedan derogadas cuantas disposiciones de inferior o igual rango se opongan a lo establecido en la presente orden.

**Disposición final primera.** *Incorporación del derecho comunitario.*

Mediante esta orden se incorpora al derecho español la Directiva 2009/113/CE, de la Comisión, de 25 de agosto, que modifica la Directiva 2006/126/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre, sobre el permiso de conducción.

**Disposición final segunda.** *Entrada en vigor.*

La presente orden entrará en vigor el día siguiente al de su publicación en el «Boletín Oficial del Estado».

Madrid, 3 de septiembre de 2010.—La Vicepresidenta Primera del Gobierno y Ministra de la Presidencia, María Teresa Fernández de la Vega Sanz.

## **10.9 Contribuciones científicas de este trabajo**

### **10.9.1 SIYO 2016**

**10.9.2 SIYO 2018**



### 10.9.3 PhDay 2019- Premio mejor póster



## 10.9.4 OPTOM 20/20 (pendiente 2021)



## OPTOM 2020



## VALORACIÓN DE LA PERCEPCIÓN DE CONTRASTE EN LA CONDUCCIÓN MESÓPICA

Marta García Rojo, Sara Gutierrez Jorin, Xabier Rodriguez Alonso, Cristina Bonnin Arias, Celia Sánchez-Ramos

Departamento de optometría y visión. Facultad de Óptica y Optometría. Universidad Complutense de Madrid

## INTRODUCCIÓN

- En condiciones de iluminación mesópica ( $0,005\text{--}5\text{ cd/m}^2$ ), el procesamiento de la información visual se reduce (1). Esto conlleva un mayor riesgo de accidentes de tráfico que se puede disminuir con una correcta evaluación y compensación de los parámetros de función visual (2).
- La valoración de la agudeza visual (AV) y de la sensibilidad al contraste (SC) para la conducción nocturna debe ser una prioridad en la normalización y baremo de la exploración de conductores. Para evaluar la función visual en condiciones mesópicas se puede plantear la adaptación de la iluminación del gabinete de optometría hasta niveles similares a los reales en conducción nocturna.
- Si bien esta técnica es viable, requiere de un proceso de normalización y calibrado de difícil implementación en los miles de Centros de Reconocimiento Médico para la obtención del permiso de conducción.

## OBJETIVO

- Encontrar un predictor fotópico de la función visual mesópica, estudiando la correlación entre la agudeza visual mesópica y la agudeza visual fotópica evaluada con test de optotipos de contraste variable y analizando la correlación entre la sensibilidad al contraste mesópica y la sensibilidad al contraste fotópica con filtros de diferentes densidades ópticas.

## MÉTODO

Para evaluar la AV se emplearon optotipos ETDRS retroiluminados ( $170\text{ cd/m}^2$ ) para visión lejana (Precision Vision, La Salle, IL) que presentan los diferentes niveles de contraste Weber desde el 100% al 1,25%.



Figura 1: SLOAN Original Series ETDRS Eye Chart "R", de Precision Vision, EE.UU. De izquierda a derecha y de arriba abajo los contrastes Weber son 100%, 20%, 10%, 2,5% y 1,25%.

Para la medida de la SC se utilizó el panel CSV 1000 retro iluminado (test de franjas o fracciones de onda de perfil sinusoidal de diferente frecuencia espacial: 3, 6, 12 y 18 cpd) para visión lejana.

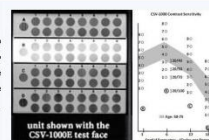


Figura 2: Vision CSV-1000 y la correspondiente plantilla de recogida de datos.

Se realizó una comparativa entre los valores de AV y SC mesópicos y los valores de AV y SC fotópicos medidos con los diferentes filtros (90%, 80% y 70%).

## RESULTADOS

El mejor predictor fotópico de la AVM es la interposición de un filtro del 80% y un contraste de optotipo del 20%

AV Mesópica	AV Fotópica	Diferencia (AVF-AVM)	R	p-valor	ICC
100%	20% filtro azul				
$0.01 \pm 0.12$	$0.01 \pm 0.11$	$-0.00 \pm 0.06$	0.68	0.0001	0.60

Tabla 1: relación entre AV mesópica al 100% y AV fotópica con filtro 80%; media de AV mesópica al 100%, media de AV fotópica 20% con filtro 80%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), p-valor y coeficiente de correlación intraclass (ICC).

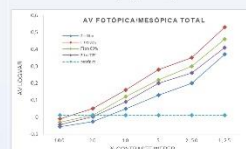


Figura 3: se representa la AVF de diferentes contrastes de optotipo (100%-1,25%) sin filtro (línea azul) y con filtros de diferentes densidades: 90% (granate), 80% (verde) and 70% (morado). La AVM (línea discontinua azul) interseca con la AVF de filtro del 80% y un contraste de optotipo del 20%.

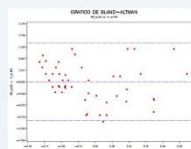


Figura 4: gráfico Bland-Altman, mide la relación entre la AV mesópica al 100% y la AV fotópica al 20% con filtro del 80%. Representa la diferencia de las medias entre la media de las dos medidas.

Los resultados mostraron los siguientes predictores fotópicos de la SCM:

- 3cpd: SCF con filtro del 90%
- 6cpd: SCF con filtro del 70%
- 12cpd: SCF con filtros del 70%
- 18cpd: SCF con filtros del 70%

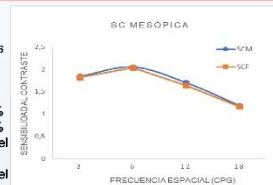


Figura 5: función de sensibilidad al contraste mesópica (azul) y fotópica (naranja) (3cpd: filtro de 90%; 6,12 y 18 cpd: filtro de 70%)

Frecuencia espacial (cpd)	SC Mesópica	SC Fotópica	Filtro	Diferencia (SCF-SCM)	ICC
3	$1.84 \pm 0.18$	$1.82 \pm 0.22$	90%	$-0.01 \pm 0.18$	0.60
6	$2.05 \pm 0.24$	$2.03 \pm 0.25$	70%	$-0.02 \pm 0.20$	0.69
12	$1.70 \pm 0.34$	$1.64 \pm 0.34$	70%	$-0.05 \pm 0.24$	0.74
18	$1.19 \pm 0.35$	$1.16 \pm 0.38$	70%	$-0.03 \pm 0.26$	0.74

## CONCLUSIONES

- Basándose en la actualidad, las normas visuales para la concesión de licencias de conducir únicamente en el rendimiento visual en condiciones fotópicas (3), hemos determinado que, en condiciones de iluminación fotópica, el uso de optotipos de contraste 20% con filtro del 80% permite valorar la agudeza visual mesópica.
- El empleo de filtros del 90% y 70% para la evaluación de la sensibilidad al contraste en condiciones fotópicas permite conocer el estado de la función visual de los conductores durante la noche. Así pues, ambos métodos podrían ser utilizados como predictores económicos y prácticos de la agudeza visual y la sensibilidad al contraste mesópica.

## REFERENCIAS

- Wood JM, Lacherez P, Tyrrell RA. Seeing pedestrians at night: effect of driver age and visual abilities. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2014;34(4):452-8.
- Braitman KA, Williams AF. Changes in self-regulatory driving among older drivers over time. *Traffic Inj Prev*. 2011;12(6):568-75.
- Gruber N, Mosimann UP, Muri RM, Nef T. Vision and Night Driving Abilities of Elderly Drivers. *Traffic Inj Prev*. 2013;14(5):477-85.

**10.10 Lista de tablas**

Tabla 1. Clasificación de principales radiaciones electromagnéticas .....	13
Tabla 2. Unidades radiométricas y fotométricas.....	20
Tabla 3. Censo de conductores con licencia. Tomado de Dirección General de Tráfico, 2016 .....	60
Tabla 4. Evolución del parque de automóviles. Informe 2007-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017.....	62
Tabla 5. Fallecidos según tramos horarios. Informe 2007-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017.....	64
Tabla 6. Fallecidos, heridos y letalidad según tramos horarios. Informe 2007-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017.....	64
Tabla 7. Accidentes con víctimas, fallecidos, heridos hospitalizados y heridos no hospitalizados según luminosidad. Vías interurbanas y urbanas. Informe 2007-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017.....	65
Tabla 8. Fallecidos por grupos de edad. Informe 2007-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017.....	66
Tabla 9. Características espectrales de los filtros utilizados (90%, 80% y 70%)......	104
Tabla 10. Características demográficas y de estado refractivo de los participantes del estudio.....	113
Tabla 11. Valor de agudeza visual binocular mesópica medido con test del 100% contraste Weber.....	114
Tabla 12. Valores de agudeza visual binocular fotópica logMAR sin filtro y con filtros de 90%, 80% y 70% medidas con test de diferente contraste Weber (100%, 20%, 10%, 5%, 2.5% y 1.25%).....	117
Tabla 13. Valores máximos y mínimos de agudeza visual binocular fotópica sin filtro y con filtros de 90%, 80% y 70% medidas con test de diferente contraste Weber (100%, 20%, 10%, 5%, 2.5% y 1.25%). .....	118

Tabla 14. Valores de agudeza visual binocular mesópica con un test de contraste 100% Weber, para el total de la muestra y en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y <i>p</i> -valor. ....	119
Tabla 15. Valores de agudeza visual binocular fotópica con un test de contraste 100% Weber, para el total de la muestra y en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y <i>p</i> -valor. ....	121
Tabla 16. Valores de agudeza visual binocular fotópica sin filtro con test de contraste 100%, 20%, 10%, 5%, 2.5% y 1.25% Weber, para el total de la muestra y en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y <i>p</i> -valor. ....	122
Tabla 17. Valores de agudeza visual binocular fotópica con filtro del 90%, con test de contraste 100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25% Weber, para el total de la muestra y en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y <i>p</i> -valor.....	123
Tabla 18. Valores de agudeza visual binocular fotópica con filtro del 80%, con test de contraste 100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25% Weber, para el total de la muestra y en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y <i>p</i> -valor.....	124
Tabla 19. Valores de agudeza visual binocular fotópica con filtro del 70%, con test de contraste 100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25% Weber, para el total de la muestra y en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y <i>p</i> -valor.....	125
Tabla 20. Relación de la Agudeza visual fotópica y mesópica de máximo contraste (100%) para el total de la muestra y según la edad (menores y mayores de 50 años).....	126
Tabla 21. Diferencia entre AV fotópica sin filtro y AV mesópica del 100%-sin filtro. ....	127
Tabla 22. Diferencia entre AV fotópica con filtro 90% y AV mesópica del 100%-sin filtro.....	128

Tabla 23. Diferencia entre AV fotópica con filtro 80% y AV mesópica del 100%-sin filtro.....	128
Tabla 24. Diferencia entre AV fotópica con filtro 70% y AV mesópica del 100%-sin filtro.....	128
Tabla 25. Relación entre AV mesópica al 100 % y AV fotópica con filtro 80%: media de AV mesópica al 100%-sin filtro, media de AV fotópica de contraste del 20% con filtro 80%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), <i>p</i> -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC). ....	130
Tabla 26. Diferencia entre AV fotópica sin filtro y AV mesópica del 100%-sin filtro para menores de 50 años. ....	132
Tabla 27. Diferencia entre AV fotópica con filtro 90% y AV mesópica del 100%-sin filtro para menores de 50 años. ....	132
Tabla 28. Diferencia entre AV fotópica con filtro 80% y AV mesópica del 100%-sin filtro para menores de 50 años. ....	133
Tabla 29. Diferencia entre AV fotópica con filtro 70% y AV mesópica del 100%-sin filtro para menores de 50 años. ....	133
Tabla 30. Relación entre AV mesópica al 100%-sin filtros y AV fotópica con filtro de 90%: media de AV mesópica al 100%, media de AV fotópica 100% con filtro 90%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), <i>p</i> -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para menores de 50 años.....	135
Tabla 31. Relación entre AV mesópica al 100%-sin filtros y AV fotópica con filtro 80%: media de AV mesópica al 100%, media de AV fotópica 20% con filtro 80%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), <i>p</i> -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para menores de 50 años.....	136
Tabla 32. Diferencia entre AV fotópica sin filtro y AV mesópica del 100%-sin filtros para mayores de 50 años.....	137

Tabla 33. Diferencia entre AV fotópica con filtro 90% y AV mesópica del 100%-sin filtros para mayores de 50 años. ....	137
Tabla 34. Diferencia entre AV fotópica con filtro 80% y AV mesópica del 100%-sin filtros para mayores de 50 años. ....	138
Tabla 35. Diferencia entre AV fotópica con filtro 70% y AV mesópica del 100%-sin filtros para mayores de 50 años. ....	138
Tabla 36. Relación entre AV mesópica al 100%-sin filtros y AV fotópica con filtro 80%: media de AV mesópica al 100%, media de AV fotópica 20% con filtro 80%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), <i>p</i> -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para mayores de 50 años.....	140
Tabla 37. Valores de sensibilidad al contraste binocular mesópica, para cuatro frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg). ....	141
Tabla 38. Valores de sensibilidad al contraste binocular fotópica sin filtro, para cuatro frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg). ....	142
Tabla 39. Valores de sensibilidad al contraste binocular mesópica para las diferentes frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg) en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y <i>p</i> -valor. ....	143
Tabla 40. Valores de sensibilidad al contraste binocular fotópica sin filtro para las diferentes frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg) en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y <i>p</i> -valor.....	144
Tabla 41. Valores de sensibilidad al contraste binocular fotópica con filtro de 90% para las diferentes frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg) en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y <i>p</i> -valor. ....	145
Tabla 42. Valores de sensibilidad al contraste binocular fotópica con filtro de 80% para las diferentes frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg) en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y <i>p</i> -valor. ....	146

Tabla 43. Valores de sensibilidad al contraste binocular fotópica con filtro de 70% para las diferentes frecuencias espaciales (3, 6, 12 y 18 cpg) en función de la edad, diferencias entre ambos grupos y <i>p</i> -valor. ....	147
Tabla 44. Diferencias de SC fotópica entre los grupos de menores y mayores de 50 años, para las frecuencias espaciales de 3, 6, 12 y 18 cpg, sin y con la interposición de filtros de 90%, 80% y 70%.....	148
Tabla 45. Diferencia entre sensibilidad al contraste fotópica sin filtro y sensibilidad al contraste mesópica.....	149
Tabla 46. Diferencia entre sensibilidad al contraste fotópica con filtro de 90% y sensibilidad al contraste mesópica.....	149
Tabla 47. Diferencia entre sensibilidad al contraste fotópica con filtro de 80% y sensibilidad al contraste mesópica.....	150
Tabla 48. Diferencia entre sensibilidad al contraste fotópica con filtro de 70% y sensibilidad al contraste mesópica.....	150
Tabla 49. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 90% para la frecuencia espacial de 3 cpg: media de SC mesópica, media de SC fotópica 90%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), <i>p</i> -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC). ....	151
Tabla 50. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 70% para la frecuencia espacial de 6 cpg: media de SC mesópica, media de SC fotópica 70%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), <i>p</i> -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC). ....	152
Tabla 51. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 70% para la frecuencia espacial de 12 cpg: media de SC mesópica, media de SC fotópica 70%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), <i>p</i> -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC). ....	153
Tabla 52. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 70% para la frecuencia espacial de 18 cpg: media de SC mesópica, media de SC fotópica 70%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), <i>p</i> -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC). ....	154



Tabla 53. Valores promedio de SC mesópica y fotópica (medida con diferentes filtros) para las frecuencias espaciales 3, 6, 12 y 18 cpq. Se muestra la diferencia entre las medidas y el Índice de correlación intraclase o ICC para estudiar la consistencia entre las medidas.....	155
Tabla 54. Diferencia entre sensibilidad al contraste fotópica sin filtro y sensibilidad al contraste mesópica para menores 50 años. ....	156
Tabla 55. Diferencia entre sensibilidad al contraste fotópica con filtro de 90% y sensibilidad al contraste mesópica para menores de 50 años. ....	156
Tabla 56. Diferencia entre SC fotópica con filtro de 80% y SC mesópica para menores de 50 años. ....	157
Tabla 57. Diferencia entre SC fotópica con filtro de 70% y SC mesópica para menores de 50 años. ....	157
Tabla 58. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 90% para la frecuencia espacial de 3 cpq: media de SC mesópica, media de SC fotópica 90%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), <i>p</i> -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para menores de 50 años.....	158
Tabla 59. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 80% para la frecuencia espacial de 6 cpq: media de SC mesópica, media de SC fotópica 80%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), <i>p</i> -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para menores de 50 años.....	159
Tabla 60. Relación entre SC mesópica y SC fotópica sin filtro para la frecuencia espacial de 12 cpq: media de SC mesópica, media de SC fotópica sin filtro, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), <i>p</i> -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para menores de 50 años.....	160
Tabla 61. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 70% para la frecuencia espacial de 18 cpq: media de SC mesópica, media de SC fotópica 70%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de	

Pearson (R), <i>p</i> -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para menores de 50 años.....	161
Tabla 62. Valores promedio de SC mesópica y fotópica en menores de 50 años (medida con diferentes filtros) para las frecuencias espaciales 3, 6, 12 y 18 cpg. Se muestra la diferencia entre las medidas y el Índice de correlación intraclase o ICC para estudiar la consistencia entre las medidas. .....	162
Tabla 63. Diferencia entre SC fotópica sin filtro y SC mesópica para mayores de 50 años.....	163
Tabla 64. Diferencia entre SC fotópica con filtro de 90% y SC mesópica para mayores de 50 años.....	163
Tabla 65. Diferencia entre SC fotópica con filtro de 80% y SC mesópica para mayores de 50 años.....	163
Tabla 66. Diferencia entre SC fotópica con filtro de 70% y SC mesópica para mayores de 50 años.....	164
Tabla 67. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 90% para la frecuencia espacial de 3 cpg: media de SC mesópica, media de SC fotópica 90%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), <i>p</i> -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para mayores de 50 años.....	165
Tabla 68. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 70% para la frecuencia espacial de 6 cpg: media de SC mesópica, media de SC fotópica 70%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), <i>p</i> -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para mayores de 50 años.....	166
Tabla 69. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 70% para la frecuencia espacial de 12 cpg: media de SC mesópica, media de SC fotópica 70%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R), <i>p</i> -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para mayores de 50 años.....	167

Tabla 70. Relación entre SC mesópica y SC fotópica con filtro de 70% para la frecuencia espacial de 18 cpg: media de SC mesópica, media de SC fotópica 70%, diferencia entre las medias, coeficiente de correlación de Pearson (R),  $p$ -valor y coeficiente de correlación intraclase (ICC) para mayores de 50 años..... 168

Tabla 71. Valores promedio de SC mesópica y fotópica en mayores de 50 años (medida con diferentes filtros) para las frecuencias espaciales 3, 6, 12 y 18 cpg. Se muestra la diferencia entre las medidas y el Índice de correlación intraclase o ICC para estudiar la consistencia entre las medidas ..... 169

### 10.11 Lista de figuras

Figura 1. Representación gráfica de los principales parámetros de una onda. Tomado de Santillana, 2012.....	11
Figura 2. Onda electromagnética. Tomada de <a href="http://www.areatecnologia.com">http://www.areatecnologia.com</a> .....	12
Figura 3. Espectro electromagnético. Tomada de University of Waikato. ....	13
Figura 4. Espectro visible por el ojo humano. Tomada de <a href="http://www.areajovensedoptica.blogspot.com">www.areajovensedoptica.blogspot.com</a> .....	14
Figura 5. Distribución de la radiación solar en la alta atmósfera y al nivel del mar, en diferentes circunstancias. Tomada de <a href="http://espaciosolar.blogspot.com.es">espaciosolar.blogspot.com.es</a> .....	15
Figura 6. Magnitudes radiométricas y fotométricas. Elaboración propia. ....	19
Figura 7. Esquema ilustrativo de las capas de la retina. Tomado de <a href="http://www.accessmedicina.com">www.accessmedicina.com</a> .....	22
Figura 8. Estructura de los fotorreceptores. ....	23
Figura 9. Sección transversal de la retina central. Tomado de <a href="http://www.elsevier.es">http://www.elsevier.es</a> .....	24
Figura 10. Absorción espectral de los conos (S, M y L) y los bastones (R). Tomado de <a href="http://psychology.wikia.com/wiki/Photopsin">http://psychology.wikia.com/wiki/Photopsin</a> .....	25
Figura 11. Distribución de conos y bastones en la retina. ....	26
Figura 12. Curvas de eficiencia luminosa espectral relativa para el observador patrón CIE en condiciones fotópicas, mesópicas y escotópicas, para el espectro visible. Tomado de Sánchez-Ramos, 2010. ....	31
Figura 13. Curva de eficiencia luminosa fotópica y escotópica. Coblentz y Emerson (1918). Tomado de Artigas, 1995.....	32
Figura 14. Curvas de eficiencia luminosa mesópica, según Wagner y Boynton (1972), obtenidas con diferentes métodos de igualación. Tomado de Artigas, 1995. ....	32

Figura 15. Curva de adaptación a la oscuridad (línea continua). La curva discontinua de puntos corresponde a los bastones y la de rayas a los conos. Tomada de Rushton (1961).....	34
Figura 16. Curvas de adaptación a la oscuridad para diferentes duraciones de las preadaptaciones a 333 mL. Tomado de Wald y Clarck, 1937. ....	35
Figura 17. Optotipo “E” de Snellen. Adaptado de Pérez Carrasco, 2006. ....	37
Figura 18. Optotipo de Snellen. Tomada de <a href="http://www.precision-vision.com">www.precision-vision.com</a> .....	40
Figura 19. “C de Landolt” Tomada de <a href="http://www.medical-dictionary.com">www.medical-dictionary.com</a> .....	40
Figura 20. Optotipo de Bailey – Lovie. Tomada de <a href="http://www.precision-vision.com">www.precision-vision.com</a> .....	41
Figura 21. Optotipos de agudeza visual china con progresión logarítmica para ser leídas de arriba a abajo y de derecha a izquierda. Tomado de Woo, 1980. ....	42
Figura 22. Variación de la agudeza visual en función de la luminancia. Tomado de Cuiña, 2003.....	43
Figura 23. Variación de la agudeza visual en función del contraste. Tomado de Cuiña, 2003.....	45
Figura 24. Función de referencia de la CIE, 1981. Sensibilidad al contraste relativa (RCS). Tomado de Artigas, 1995.....	48
Figura 25. Modelo de red sinusoidal. Tomado de Pérez-Carrasco, 2006. ....	49
Figura 26. Red de perfil cuadrado de frecuencia espacial baja y alta. Tomado de <a href="http://www.contrastsensitivity.net">www.contrastsensitivity.net</a> .....	50
Figura 27. Función de Sensibilidad al contraste (FSC). Tomado de Kalpana, 2009. ....	51
Figura 28. Correlación entre un test de agudeza visual de bajo, medio y alto contraste, de optotipos de contraste variable, de optotipos de alto contraste y la función de sensibilidad al contraste. Cortesía de Pérez-Carrasco.....	52

Figura 29. Test Vistech de sensibilidad al contraste. Tomada de Ginsburg, 1984. ....	53
Figura 30. Test Functional Acuity Contrast. Tomada de Ginsburg, 1984. ....	53
Figura 31. Panel CSV-1000 con test. Tomada de <a href="http://www.good-lite.com">www.good-lite.com</a> . ....	54
Figura 32. Test de sensibilidad al contraste Pelli-Robson. Tomado de Williamson, 1992. ....	55
Figura 33. Curvas de sensibilidad al contraste obtenidas con distintos tests. Tomado de Vision Sciences, 2002. ....	56
Figura 34. Curvas de sensibilidad al contraste en función de la edad. Tomado de Owsley et al., 1983. ....	56
Figura 35. Censo de conductores por 1000 habitantes cuya edad habilita a conducir. Informe 2007-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017. ....	61
Figura 36. Proyección de los decesos en accidentes de tráfico en España. 1960-2016 Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017. ....	63
Figura 37. Evolución de la letalidad ( $n.^{\circ}$ de fallecidos / $n.^{\circ}$ de víctimas x 100) en los accidentes de tráfico con víctimas. España 1993-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017. ....	63
Figura 38. Tasa de fallecidos según edad y sexo por millón de habitantes. Informe 2007-2016. Tomada de Dirección General de Tráfico, 2017. ....	66
Figura 39. Transmitancia normal en el ojo y transmitancia de un filtro de longitud de onda de corte de 511nm. Tomado de Sánchez-Ramos 2010. ....	79
Figura 40. Curvas de absorción espectral de filtros. Tomado de Sánchez-Ramos 2010. ....	80
Figura 41. Recreación de la disposición de los elementos de la sala de exploración. Elaboración propia. ....	97
Figura 42. Recreación de la disposición del participante y del optometrista. Elaboración propia. ....	97

Figura 43. Plano y medidas de la sala de exploración. Elaboración propia. ....	98
Figura 44. Luxómetro Mavolux, modelo 5032B USB Gossen, con el adaptador para medir luminancias en $\text{cd/m}^2$ . Cortesía de Aguirre Bueno, 2012. ....	99
Figura 45. Sala de pruebas en condiciones de iluminación fotópica. ....	100
Figura 46. Sala de pruebas en condiciones de iluminación mesópica. ....	100
Figura 47. SLOAN Original Series ETDRS Eye Chart "R", de Precision Vision, EE.UU. De izquierda a derecha y de arriba abajo, los contrastes Weber son 100%, 20%, 10%, 2,5% y 1,25%. Tomado de <a href="http://www.precisionvision.com">www.precisionvision.com</a> . ....	101
Figura 48. ETDRS Illuminator Cabinet. Detalle del soporte del panel. Tomado de <a href="http://www.precisionvision.com">www.precisionvision.com</a> ....	102
Figura 49. Mixed Contrast/ Variable Distance Colenbrander. Vision Chart.ETDRS 100% y 20% de contraste utilizado. Tomado de <a href="http://www.precision-vision.com">www.precision-vision.com</a> ....	102
Figura 50. Optotipo CSV- 1000 para la valoración de la sensibilidad al contraste. Hoja de resultados del test CSV-1000. Tomado de <a href="http://www.vectorvision.com">www.vectorvision.com</a> .....	103
Figura 51. Curva de transmisión filtro 90%.....	104
Figura 52. Curva de transmisión filtro 80%.....	104
Figura 53. Curva de transmisión filtro 70%.....	104
Figura 54. Frontofocómetro Zeiss Humphrey Lens Analyzer lensmeter. Modell 350.....	104
Figura 55. Agudeza visual binocular mesópica de contraste de test 100%....	115
Figura 56. Agudeza visual binocular fotópica sin filtro de contraste de test: 100%, 20%, 10%, 5%, 2.5% y 1.25%.....	115
Figura 57. Agudeza visual binocular fotópica con filtro del 90% de contraste de test: 100%, 20%, 10%, 5%, 2.5% y 1.25%. ....	116

Figura 58. Agudeza visual binocular fotópica con filtro del 80% de contraste de test: 100%, 20%, 10%, 5%, 2.5% y 1.25%. .....	116
Figura 59. Agudeza visual binocular fotópica con filtro del 70% de contraste de test: 100%, 20%, 10%, 5%, 2.5% y 1.25%. .....	117
Figura 60. Agudeza visual binocular mesópica al 100% de contraste de test para menores y mayores de 50 años. ....	120
Figura 61. Agudeza visual binocular fotópica al 100% de contraste de test para menores y mayores de 50 años. ....	121
Figura 62. Agudeza visual binocular fotópica con diferentes contrastes de optotipo (100%,20%,10%,5%,2,5% y 1,25%) en menores y mayores de 50 años. ....	122
Figura 63. Agudeza visual binocular fotópica con filtro de 90% y diferentes contrastes de optotipo (100%,20%,10%,5%,2,5% y 1,25%) en menores y mayores de 50 años.....	123
Figura 64. Agudeza visual binocular fotópica con filtro de 80% y diferentes contrastes de optotipo (100%,20%,10%,5%,2,5% y 1,25%) en menores y mayores de 50 años. ....	124
Figura 65. Agudeza visual binocular fotópica con filtro de 70% y diferentes contrastes de optotipo (100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%) en menores y mayores de 50 años. ....	125
Figura 66. Agudeza visual mesópica 100%-sin filtro y fotópica sin y con filtros (90%, 80% y 70%) para los diferentes contrastes de optotipo (100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%) para el total de la muestra. ....	129
Figura 67. Agudeza visual mesópica 100%-sin filtro y fotópica sin y con filtros (90%, 80% y 70%) para los contrastes de optotipo (100%, 20% y 10%) para el total de la muestra.....	130
Figura 68. Gráfico Bland-Altman, relación AV mesópica al 100%-sin filtro y AV fotópica al 20% con filtro del 80%.....	131



Figura 69. Agudeza visual mesópica 100%-sin filtros y fotópica sin y con filtros (90%, 80% y 70%) para los diferentes contrastes de optotipo (100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%) para menores de 50 años. ....	134
Figura 70. Agudeza visual mesópica 100%-sin filtros y fotópica sin y con filtros (90%, 80% y 70%) para los contrastes de optotipo (100%, 20% y 10%) para menores de 50 años. ....	134
Figura 71. Gráfico Bland-Altman, relación AV mesópica al 100%-sin filtros y AV fotópica al 100% con filtro del 90% en menores de 50 años. ....	135
Figura 72. Gráfico Bland-Altman, relación AV mesópica al 100%-sin filtros y AV fotópica al 20% con filtro del 80% en menores de 50 años. ....	136
Figura 73. Agudeza visual mesópica 100%-sin filtros y fotópica sin y con filtros (90%, 80% y 70%) para los diferentes contrastes de optotipo (100%, 20%, 10%, 5%, 2,5% y 1,25%) para mayores de 50 años. ....	139
Figura 74. Agudeza visual mesópica 100%-sin filtros y fotópica sin y con filtros (90%,80% y 70%) para los contrastes de optotipo (100%, 20% y 10%) para mayores de 50 años. ....	139
Figura 75. Gráfico Bland-Altman, relación AV mesópica al 100%-sin filtros y AV fotópica al 20% con filtro del 80% en mayores de 50 años. ....	140
Figura 76. Función de sensibilidad al contraste mesópica. ....	141
Figura 77. Función de sensibilidad al contraste mesópica: menores y mayores de 50 años. ....	144
Figura 78. Función de sensibilidad al contraste fotópica sin filtro: menores y mayores de 50 años. ....	145
Figura 79. Función de sensibilidad al contraste fotópica con filtro de 90%: menores y mayores de 50 años. ....	146
Figura 80. Función de sensibilidad al contraste fotópica con filtro de 80%: menores y mayores de 50 años. ....	147
Figura 81. Función de sensibilidad al contraste fotópica con filtro de 70%: menores y mayores de 50 años. ....	148

Figura 82. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 90% para una frecuencia espacial de 3 cpG.....	151
Figura 83. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 70% para una frecuencia espacial de 6 cpG.....	152
Figura 84. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 70% para una frecuencia espacial de 12 cpG.....	153
Figura 85. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 70% para una frecuencia espacial de 18 cpG.....	154
Figura 86. Función de sensibilidad al contraste mesópica (azul) y fotópica (granate) (3cpG: filtro de 90%; 6,12 y 18 cpG: filtro de 70%). ....	155
Figura 87. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 90% para una frecuencia espacial de 3 cpG en menores de 50 años. ....	158
Figura 88. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 80% para una frecuencia espacial de 6 cpG en menores de 50 años. ....	159
Figura 89. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica sin filtro para una frecuencia espacial de 12 cpG en menores de 50 años. ....	160
Figura 90. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 70% para una frecuencia espacial de 18 cpG en menores de 50 años. ....	161
Figura 91. Función de sensibilidad al contraste mesópica y fotópica (3cpG: filtro de 90%; 6: filtro de 80%,12: sin filtro y 18 cpG: filtro de 70%). ....	162
Figura 92. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 90% para una frecuencia espacial de 3 cpG en mayores de 50 años.....	165
Figura 93. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 70% para una frecuencia espacial de 6 cpG en mayores de 50 años.....	166
Figura 94. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 70% para una frecuencia espacial de 12 cpG.....	167
Figura 95. Gráfico Bland-Altman SC mesópica y SC fotópica filtro de 70% para una frecuencia espacial de 18 cpG en mayores de 50 años.....	168

Figura 96. Función de sensibilidad al contraste mesópica y fotópica (3cpg: filtro de 90%; 6,12 y 18 cpg: filtro de 70%). .....	169
---	-----